Julia Schnetzer



UN FULGOR EN LA OSCURIDAD

Viaje al fascinante mundo de los océanos



El Ojo del Tiempo **Siruela**

Julia Schnetzer

UN FULGOR EN LA OSCURIDAD

Viaje al fascinante mundo de los océanos

Traducción del alemán
de Alfonso Castelló

Siruela

El Ojo del Tiempo

Edición en formato digital: agosto de 2023

Título original: *Wenn Haie Leuchten* En cubierta: ilustración © Rawpixel Diseño gráfico: Gloria Gauger © Carl Hanser Verlag GmbH & Co., KG, Múnich, 2021

Derechos negociados por mediación de Ute Körner Literary Agent www.uklitag.com

Ediciones Siruela, S. A.

c/ Almagro 25, ppal. dcha.

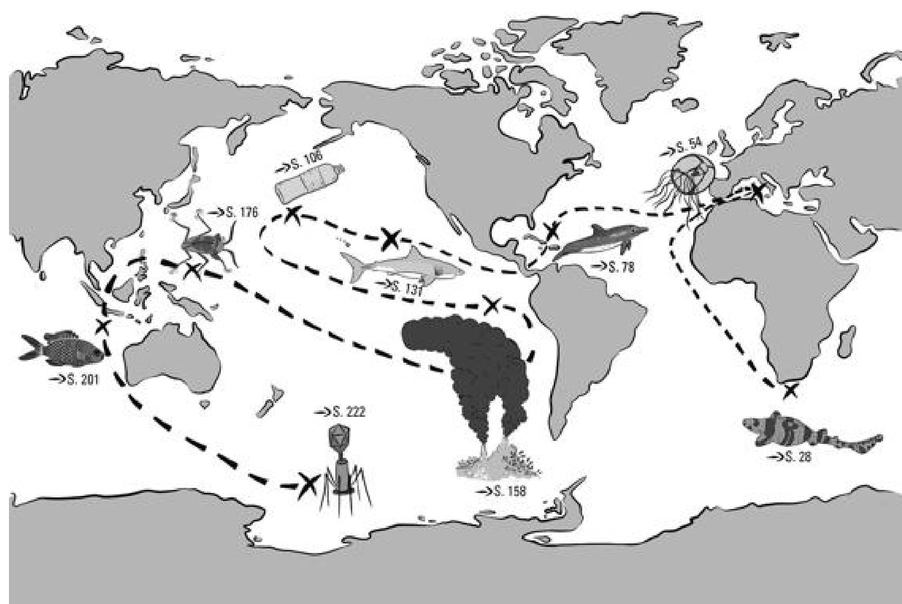
www.siruela.com

ISBN: 978-84-19744-13-5

Conversión a formato digital: María Belloso

Índice

Para mis padres


→S. 106
→S. 176
→S. 54
→S. 78
→S. 131
→S. 201
→S. 222
→S. 158
→S. 28

Prólogo

2003 fue un año decisivo para mí porque me enamoré. Para mi décimo octavo cumpleaños, mis padres cumplieron uno de mis mayores deseos: viajar al mar del Sur. Desde pequeña, me fascinaban los artículos y las imágenes de playas blancas llenas de palmeras, aguas azul turquesa y el colorido mundo submarino, lleno de misterio. Todos los fines de semana de mi niñez me arrastraban a las montañas, a lo mejor por eso anhelaba tanto lo contrario.

Ocurrió en las vacaciones de verano. Viajé a las islas Fiyi con un grupo de jóvenes de toda Alemania, a una isla pequeña aislada de todo, sin electricidad, sin agua corriente, bañada por el mar. Vivíamos con una familia de acogida, en su cabaña de madera en la playa, y participábamos de su día a día. Cada jornada descubría algo nuevo, lo que más me gustaba era caminar por el arrecife de coral que estaba delante de nuestra casa durante la marea baja, para poder ver por fin con mis propios ojos los animales tan fascinantes que solo conocía por la televisión.

Nuestro padre de acogida, Bai, que sigue siendo para mí la personificación de la calma y la serenidad, cumplió otro de mis sueños de niñez llevándome a bucear. Esa fue mi primera vez bajo el agua con botella, en uno de los arrecifes más bellos del mundo. Flotaba ingrávida por las paredes del arrecife; los peces de colores se arremolinaban a mi alrededor, grupos de enormes barracudas pasaban por delante de mí, las tortugas nadaban cómodamente sin reparar apenas en mi presencia, y un tiburón apareció nadando justo a mi lado con toda su elegancia, tan cerca que podría haberlo tocado. ¡No quería volver a la superficie nunca más! Me había enamorado definitivamente de ese mundo tan distinto y maravilloso. Ese fue el día en que decidí estudiar biología marina.

Casi veinte años después, nada ha cambiado y sigo tan enamorada como entonces. Durante este tiempo, he descubierto muchos de los secretos del mar, pero aún hay muchas cosas que no sé, que no sabemos. Me gustaría compartir algunos de esos secretos en este libro, porque ya se sabe que el amor es mejor cuando se comparte.

Acqua Incognita: Un mar lleno de misterios

Sin duda, la biología marina es la disciplina más atractiva de las ciencias naturales, quizás incluso de todas las ciencias. Al buscar biólogas o biólogos marinos en Internet, aparecen imágenes de personas buceando, o con el traje de neopreno y las gafas de buceo en la playa o en un barco. Coloridas fotografías de corales, tortugas y tiburones. De vez en cuando se ve también alguna de alguien en un laboratorio, pero con un acuario al fondo, por supuesto. La biología marina es una profesión de ensueño. ¿Son veraces las imágenes? Sí. ¿El trabajo siempre es así? No tanto.

Por supuesto que hay gente afortunada que puede sumergirse día sí día también en las maravillas del océano. Sin embargo, para muchas otras personas, el día a día es diferente: la mayor parte del tiempo consiste en trabajo de laboratorio y escritorio. Una vez al año puede haber una salida con el barco o una expedición a la costa para recoger muestras y recopilar datos. Con suerte, la expedición es a playas paradisiacas o al salvaje Ártico; algunas personas se pasan varios meses en un barco en el hielo eterno. No obstante, no son vacaciones, hay que ponerse las pilas, en un día se pueden trabajar veinte horas. Cuando hay que volver a ponerse el neopreno aún húmedo después de haber dormido cuatro horas, a veces se echa de menos el sofá de casa. O cuando hay que remover el fango durante la marea baja en el frío de febrero con los dedos medio congelados. Preparar cebos bien temprano, machacando caballas con las manos, no es una actividad para todos los estómagos. Los mareos, por supuesto, son el mayor enemigo al que todas las personas que se dedican a las ciencias del mar deben enfrentarse en la vida; quien crea que tiene aguante, que pruebe a mirar por un microscopio durante horas en un barco que se balancea. Aun así, todas las penas se olvidan rápidamente cuando un grupo de ballenas saluda enseñando la cola y las nubes que expulsan brillan con la luz de la mañana.

En esta profesión no falta la acción: saltos hacia tiburones más grandes que tú, golpes con aletas caudales que te hacen ver las estrellas, agarrarse a un coral de fuego mientras se toman muestras y tener que nadar entre olas terroríficas para recuperar equipos son solo algunas de las aventuras que se pueden vivir. Mejor no hablar de las púas de los erizos de mar. ¡Todo sea por los datos! Una vez recogidos, vienen semanas frente al ordenador introduciéndolos, devanándose los sesos con evaluaciones estadísticas o experimentos en el laboratorio que no salen como deberían. Y luego el horror: de alguna manera, hay

que resumirlo todo en un artículo científico. El dolor de espalda provocado por el trabajo de escritorio también está muy extendido entre científicos y científicas.

La vida de las biólogas marinas no es solo verano, sol y playa, también puede ser un trabajo duro, pero creo que todas las personas que hemos elegido esta profesión hacemos estas tareas con pasión, entusiasmo y placer, aunque a veces sean absurdas. Y merece la pena, no solo por la ciencia sino por todo el mundo, porque sin la pasión de esas personas no tendríamos ni idea de lo importantes e indispensables que son nuestros océanos, también para nuestra vida. La superficie de nuestro planeta azul, que paradójicamente se llama «Tierra», está compuesta en más de un 70 % de agua, y la mayoría del agua se encuentra en los océanos, que no solo se distribuyen por casi dos tercios de la superficie del planeta, sino que también son muy profundos, con una profundidad media de 4.000 metros. Suponen el 99 % del hábitat de la Tierra y forman su mayor ecosistema, que, a su vez, se compone de muchos otros ecosistemas distintos: océano profundo, mar abierto, lecho marino, costas, aguas poco profundas, aguas frías, aguas calientes… Cada una de las particularidades del océano crea su propio ecosistema, al que se han adaptado los seres vivos más diversos, como bacterias, virus, algas, plantas, peces, pájaros, reptiles o mamíferos. Todos estos ecosistemas están interconectados a través de las corrientes, y eso lo sabían ya los antiguos griegos. El término «océano» procede del griego antiguo *ōkeanós*, que significa «la corriente mundial que rodea la tierra». También las personas estamos vinculadas al mar, aunque vivamos a cientos de kilómetros de él: el mar, o mejor dicho, las algas y bacterias que viven en él son la principal fuente del oxígeno que necesitamos para vivir. El mar transporta calor del ecuador a los polos, regulando el tiempo y el clima. Sin la corriente del Golfo, nos pelaríamos de frío en Europa. El mar es el almacén de dióxido de carbono más importante de nuestro planeta. También resulta enormemente importante desde un punto de vista económico porque funciona como autopista comercial, suministra alimentos a millones de personas y crea trabajos en muchos sectores distintos. Algunas estimaciones afirman que el océano supone la forma de vida de tres mil millones de personas. Sin embargo, lo tratamos muy mal, y es que, aunque hayamos conseguido volar hasta Marte, aún no sabemos exactamente cómo es el lecho marino que tenemos frente a nuestras casas. ¿Y cómo vamos a saber cuánto sabemos si no sabemos cuánto desconocemos?

A menudo se dice que hemos investigado solamente un 5% de los mares. Esta cifra se refiere en realidad al lecho marino, pero se usa con frecuencia para referirse a toda la investigación marina. En realidad, se ha medido prácticamente todo el lecho marino (lo que se

conoce como batimetría), pero con una resolución de unos 5 kilómetros. Es decir, como en los juegos de ordenador antiguos con gráficos pobres, cuando no se podían representar estructuras más pequeñas que un píxel. Por eso, Pac-Man tenía un punto negro como ojo, no era posible más detalle. En las mediciones por satélite, los «píxeles» tienen un lado de cinco kilómetros. Todas las estructuras más pequeñas no se pueden medir, por lo que estas mediciones solo permiten ver grandes montañas, barrancos y valles submarinos, todo lo demás queda oculto. Por comparar: todo Marte está medido con una resolución de seis metros, pero solo un 5% aproximadamente del lecho marino está cartografiado con esa resolución. Los motivos son, por un lado, que se invierte más dinero en la investigación espacial que en la marina y, por otro, que la medición del lecho marino es más difícil porque el agua está en medio. Con los satélites podemos determinar la temperatura de la superficie del agua y, según el color de esta, también el contenido de algas, pero no podemos mirar más allá, porque la radiación electromagnética, como la luz, no puede penetrar mucho en el agua. Para cartografiar de forma aproximada el lecho marino usando satélites, se miden las diferencias de altura con radares. Las cordilleras submarinas tienen una densidad superior y, con ella, mayor fuerza de atracción. Esto provoca que el agua se concentre ahí, aumentando el nivel del mar; sobre los valles submarinos baja. Estas diferencias en la superficie permiten determinar la estructura del lecho marino. Es extraño: el nivel del mar no es igual de alto en todas partes, y el mar está lleno de pequeñas protuberancias que no se notan cuando se navega en barco sobre ellas.

Para obtener una medición del lecho marino con alta resolución, se trabaja con un sistema batimétrico de barrido ancho: desde un barco se envían barridos de ondas de sonido que rebotan contra el lecho marino, según el tiempo que tarda el eco en volver se puede determinar la profundidad del agua. Este método permite conseguir una resolución de unos cincuenta metros. Los robots submarinos autónomos que trabajan más cerca del suelo pueden alcanzar resoluciones de centímetros; esos drones submarinos se usaron en la búsqueda del Boeing 777 del vuelo MH370 de Malaysia Airlines caído en el océano Índico. La búsqueda no tuvo éxito, pero se descubrieron volcanes extintos, cordilleras y fosas marinas desconocidas hasta entonces. La tragedia del vuelo mostró al público las carencias en investigación marina.

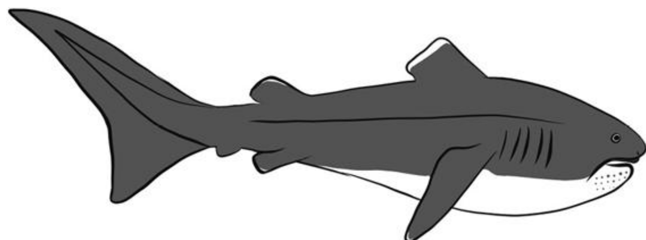
Tener mapas en alta resolución del lecho marino es muy importante para entender la historia de nuestro mundo y prever su futuro. Las formas del lecho marino nos hablan de los movimientos de la tectónica del planeta y revelan dónde hay vulcanismo, fuentes hidrotermales y otros ecosistemas ocultos en las profundidades. Toda

esa información es muy importante a la hora de determinar peligros de terremotos y maremotos, estimar reservas de materias primas y crear zonas de protección; también ayuda a entender mejor las características generales del océano, como los trazados de las corrientes, la circulación, los fenómenos meteorológicos, el transporte de sedimentos y el cambio climático. Por eso, el proyecto Seabed 2030 se ha puesto como objetivo medir toda la estructura de la superficie del lecho marino hasta 2030. Un solo barco tardaría cientos de años en medir todo el lecho marino, por eso, el proyecto utiliza la estrategia de *crowdsourcing*, cuantos más participantes haya, más rápido avanzará. Hasta ahora, Seabed 2030 tiene 133 socios y participantes en todo el mundo. En junio de 2020, Seabed 2030 había conseguido cartografiar 14,5 millones de kilómetros cuadrados, es decir, aproximadamente un 20% de la superficie del fondo marino, de la forma más moderna posible. Por tanto, lo del 5% es historia, y hay posibilidades de que en 2030 haya disponible un mapa en 3D del lecho marino en alta resolución de libre disposición.

La superficie marina también esconde sorpresas. Antes, la gente de mar se echaba a navegar para cartografiar nuevas tierras o islas. Hoy en día, contribuyen a eliminarlas del mapa: siguen existiendo las llamadas islas fantasma, que existen en los mapas pero no en la realidad. Estas islas surgieron en la época de la navegación marina, cuando aún no era posible determinar la posición exacta usando GPS. Muchas veces los marinos se equivocaban de posición y, al encontrar tierra, la registraban en las cartas náuticas como tierra nueva con coordenadas incorrectas. A veces, simplemente se inventaban islas por codicia y ansia de fama, pero también las nubes bajas o alucinaciones pasaban por presuntas costas de vez en cuando. Por supuesto, el mar ha acabado engullendo algunas otras islas que existieron realmente. En los mapas del siglo XIX aún hay registradas unas doscientas islas fantasma, e incluso en el siglo XXI algunos investigadores siguen en sus trece: en 2012, la isla Sandy Island apareció, en teoría, frente a un barco de investigación que navegaba entre Australia y Nueva Caledonia. En realidad, los investigadores vieron divertidos cómo su barco atravesaba el píxel de Google Maps marcado como Sandy Island. Simplemente, estaban en aguas muy profundas. Esto quiere decir que las islas que descubrió el capitán Cook (entre 1772 y 1775) probablemente nunca existieron. También la isla Bermeja, en el golfo de México, se declaró inexistente en 2009 después de una búsqueda intensiva.

El mar tiene aún mucho por descubrir, no solo en cuanto a geografía, también la flora y la fauna es muy desconocida. Un buen ejemplo de ello es el tiburón de boca ancha (*Megachasma pelagios*), que, a pesar de alcanzar hasta siete metros de longitud, no se descubrió hasta 1976. El

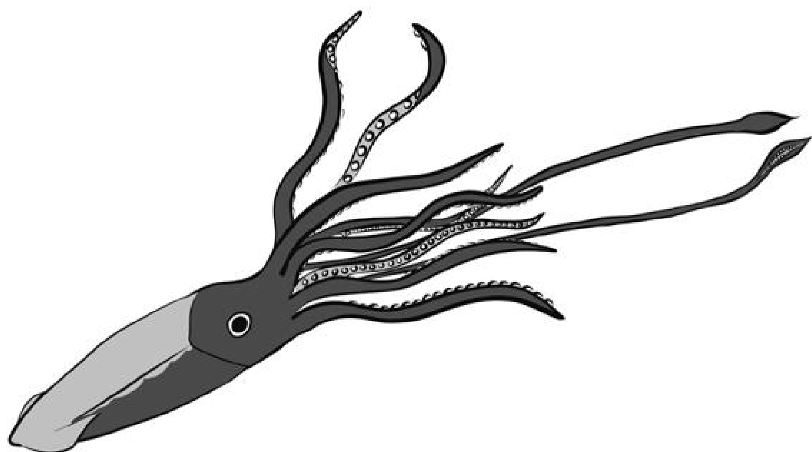
nombre lo dice todo: con su enorme boca filtra los pequeños organismos del agua, como lo hacen el tiburón peregrino o el tiburón ballena, excepto que este prefiere el krill al plancton. Hasta ahora no se sabe mucho más de este tipo de tiburón, ha habido muy pocos encuentros: desde 1976 hasta 2018 solo ha habido 117 avistamientos, menos de tres al año. Parece que le gustan las aguas tropicales y templadas y, al parecer, hay mayor probabilidad de encontrarlo en el Pacífico, en aguas de Japón, Filipinas y Taiwán. ¡Sin miedo, que no muerden!



El tiburón de boca ancha, que alcanza los siete metros de longitud, se queda en aguas profundas durante el día y solo sube a la superficie de noche, lo que podría explicar que haya habido tan pocos avistamientos.

La novela de Julio Verne *Veinte mil leguas de viaje submarino* hizo famoso al calamar gigante. Hace tiempo que sabemos que existe realmente y que no es solo un producto de la imaginación de los marineros, ya que han aparecido ejemplares muertos en la costa o en redes de arrastre. Sin embargo, hasta 2012 no pudimos disfrutar de ver un calamar gigante vivo en su hábitat natural del océano profundo: una cámara pudo captar al animal frente a las islas japonesas de Ogasawara, a 700 metros de profundidad. Las cautivadoras imágenes muestran un calamar gigante de unos cuatro metros cuya piel brilla en plata y rojo dorado a la luz de las linternas. Esto fue posible gracias al ingenioso sistema de cámaras Medusa, que se sumerje sujeto por un cable, sin motores para avanzar y, por tanto, sin ruidos que puedan molestar a los animales. En lugar de la luz blanca que suele utilizarse para los faros de los botes submarinos, en este caso se usó luz roja, que la mayoría de organismos de las profundidades no puede ver, de modo que no los asusta. Como cebo se utilizó lo que se conoce como una medusa eléctrica: pequeñas luces LED que se iluminan consecutivamente, formando un círculo de luz que imita el mecanismo de defensa de las medusas de aguas profundas. Las medusas se iluminan cuando sufren un ataque para atraer a los grandes depredadores, como el calamar gigante, así, el depredador de la medusa se convierte en la presa del calamar. En 2019, un equipo aplicó esta estrategia con éxito en el golfo de México,

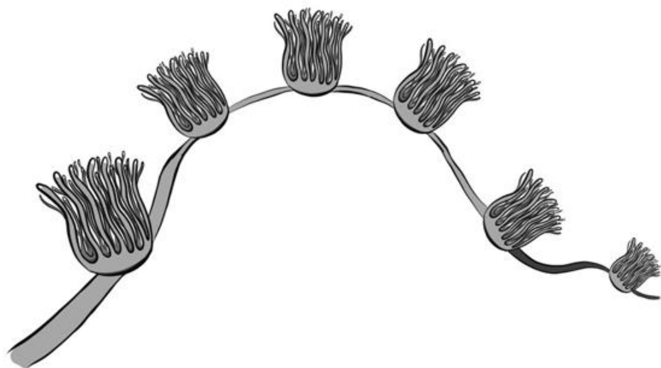
donde se captó con la cámara a otro de estos gigantes explorando la falsa medusa y la cámara con los tentáculos.



Los calamares gigantes se distribuyen por todo el mundo y se cree que viven a una profundidad entre 500 y 1.000 metros. Tienen una longitud media de cinco metros, desde la cabeza al tentáculo más largo. Las crónicas que hablan de longitudes de hasta doce metros tienen en cuenta que los tentáculos se pueden estirar: si se miden estirados, el animal puede doblar su tamaño.

Actualmente, hay muchas otras especies todavía desconocidas en el fondo de los océanos. Según algunas estimaciones, el mar contiene alrededor de un millón de especies animales y vegetales, de las cuales dos tercios aún están por descubrir. Entre 2000 y 2010, el proyecto Census of Marine Life (Censo de la vida marina) se puso como meta obtener un cuadro general de la diversidad de especies, su distribución y población en el océano. El esfuerzo fue enorme: participaron 27.000 científicos y científicas de más de 80 países y se hicieron quinientas cuarenta expediciones en barcos, además de innumerables horas de trabajo en playas y costas. El trabajo mereció la pena, porque se clasificaron 1.200 nuevas especies más y se descubrieron otras 50.00 potenciales. Se demostró que un litro de agua de mar tiene tanta diversidad que puede contener hasta 38.000 tipos distintos de bacterias; también hubo sorpresas, como la aparición de un tipo de crustáceo de diez patas, *Neoglyphea neocaledonica*, que se suponía extinto desde hace cincuenta millones de años. La cantidad de descubrimientos de especies y hábitats que consiguió el censo demostró también lo poco que se sabe aún de los océanos, y la finalización del proyecto no supuso el fin de la búsqueda, cada año se siguen clasificando nuevas especies marinas. Durante una expedición en aguas profundas en 2020 se descubrieron treinta nuevas especies y se estableció un nuevo récord: la ballena azul perdió el trono de animal más grande en favor de un nuevo tipo de medusa (*Apolemia*, ver ilustración). Hay que reconocer que la comparación no es del todo

justa para la ballena azul, ya que la medusa es un sifonóforo flotante, y no es un solo individuo sino una colonia compuesta de miles de clones que, sin embargo, funcionan como una unidad, al igual que las colonias de coral. Los clones forman una especie de hilo que flota en el agua, esperando a que su presa nade hacia sus tentáculos.



Aún nos queda mucho por descubrir y la investigación sigue siendo un gran reto, especialmente en las profundidades del océano. Como seres terrestres, el agua nos es un elemento ajeno. Como no podemos respirar bajo el agua, solo podemos sumergirnos en ese mundo durante un breve espacio de tiempo, incluso contando con la tecnología más moderna. La luz solo llega a los primeros 200 metros de profundidad, más allá reina la oscuridad. Con cada metro de profundidad, la presión aumenta en 0,1 bares; en el punto más profundo del océano, la fosa de las Marianas, a unos 11.000 metros de profundidad, la presión alcanza los 1.100 bares: una presión similar a la que ejercerían dos elefantes adultos sobre tu dedo pequeño del pie. Sin un equipamiento de última generación, el océano profundo literalmente te aplasta. Las tormentas y las olas convierten la navegación en mar abierto en una aventura, incluso para los barcos más grandes. Todas estas circunstancias hacen que la investigación sea laboriosa y cara y, aun así, pasan muchas cosas en las ciencias marinas. En los siguientes capítulos os quiero mostrar lo fascinante y diversa que es no solo la vida en el mar sino también la ciencia que se ocupa de ella, cómo estas historias aparentemente ajenas impactan en nuestra vida diaria y cuánto, o cuán poco, sabemos realmente sobre estos ecosistemas que nos resultan tan ajenos. Os invito a una expedición por los siete mares y por algunos de los muchos misterios que aún esconden.

Cuando los tiburones brillan

En los años 60, la comunidad científica estrujó a cientos de medusas *Aequorea victoria* para aislar una proteína fascinante que hace que estas brillen: la *Green Fluorescent Protein*, o GFP. La muerte de estas medusas en el laboratorio no fue en vano, ya que, treinta años más tarde, esta proteína revolucionó la biología y la medicina. Quien se haya licenciado en Biología y no sepa qué es la GFP, o ha salido mucho de fiesta o ha estado yendo a las clases equivocadas; a quienes no saben de biología se les perdona el desconocimiento. Como anuncia su nombre, la GFP tiene una propiedad especial: brilla en color verde, es decir, que cuando se expone a una luz con mucha energía, como la luz azul o la ultravioleta, se ilumina en verde claro.

Cuando se descodificó el gen de esta proteína en los años 90, se descubrió que combina muy bien con otras proteínas sin perjudicar su funcionamiento, lo que abrió un abanico de fantásticas aplicaciones en biotecnología. Gracias a la ingeniería genética, se puede pegar el gen GFP a otro gen con mucha precisión. Cuando el gen manipulado se copia y se crea una nueva proteína, se incluye también la GFP. El resultado: una proteína que brilla y permite ver con un microscopio cómo y dónde se distribuye en la célula. Así, por primera vez, se pudo observar con gran precisión determinadas proteínas y su concentración, distribución y movimiento en la célula viva. En directo y a todo color (verde).

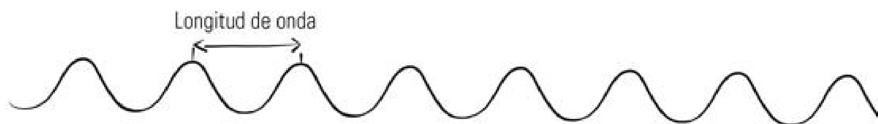
Esto no solo se puede aplicar a nivel celular sino a todo un ser vivo. Ya se han criado gatos que brillan, pero no por diversión: los gatos modificados genéticamente se usan en la investigación del VIH, por ejemplo. Para ello, se inserta un gen que potencialmente pueda rechazar el VIH junto con el gen GFP en los óvulos. Aquí, la GFP actúa como marcador: si los gatos nacidos de los óvulos manipulados brillan en verde bajo luz ultravioleta, quiere decir que la transmisión del gen se ha realizado correctamente. La GFP también se suele usar como marcador para buscar ciertas bacterias. Para ello, se crean sondas de ADN especiales marcadas con la GFP. Estas sondas se añaden a una muestra y solo se unen a bacterias con fragmentos de ADN idénticos. Luego, solo es cuestión de aplicar luz ultravioleta y mirar por el microscopio, y ahí están las células bacterianas brillando en verde esmeralda. Esas sondas de ADN también permiten investigar la expresión genética para comprobar si un determinado gen se activa o desactiva. Esto ayuda a entender la función de genes desconocidos o para investigar cómo reaccionan las células al estrés o a la enfermedad. Estos son solo algunos ejemplos de cómo se usa la GFP en

el laboratorio día a día, pero ilustra la importancia de la GFP en las últimas décadas y en el futuro. No es de extrañar, por tanto, que el innovador trabajo de Martin Chalfie, Osamu Shimomura y Roger Tsien, que han investigado la (y con la) GFP, mereciera el Premio Nobel de Química en 2008, ya que aún no hay un Premio Nobel de Biología.

Además, la GFP no tiene que ser verde obligatoriamente. Con un par de pequeñas modificaciones genéticas, se puede conseguir una versión de la GFP amarilla, azul o cian, un verde azulado. Los distintos colores permiten observar varias proteínas, bacterias o similares al mismo tiempo. Cuantos más colores, mejor. Lo único que no se había conseguido era el color rojo, pero eso cambió cuando se encontró otra fuente de proteínas fluorescentes.

En una fiesta en Moscú, un biólogo observó un acuario de agua marina iluminado con luz negra y quedó maravillado con los colores psicodélicos de las anémonas y los corales. Al igual que en el caso de la GFP, el mar y los cnidarios volvieron a ser el origen de nuevas proteínas fluorescentes que, ahora sí, permitían conseguir fluorescencia roja, naranja y morada.

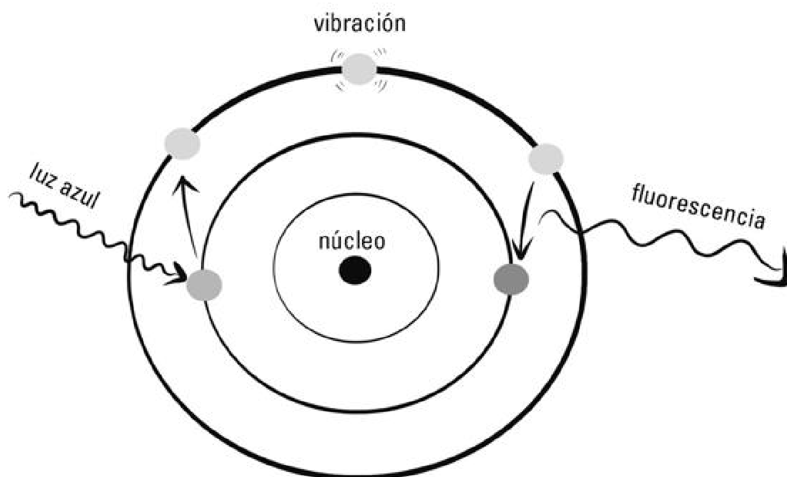
Pero ¿qué es exactamente la fluorescencia y qué función tiene en la naturaleza? Lo que denominamos luz visible es la radiación electromagnética en forma de ondas que podemos ver con nuestros ojos. Nuestra percepción óptica se mueve en una longitud de onda de entre 380 y 750 nanómetros, aproximadamente. La longitud de onda es la distancia entre el punto más alto de una onda y el siguiente. Cuanto más corta es la longitud de onda, más energía tiene la radiación; es algo parecido a las cuerdas de batalla del gimnasio: es más difícil crear muchas ondas pequeñas con la cuerda que pocas ondas más grandes, para las pequeñas hace falta más energía de la persona que está entrenando. La luz azul tiene una longitud de onda corta de unos 420 nanómetros, es decir, de alta energía. La luz roja está en el otro lado del espectro y tiene menos energía, con una longitud de unos 750 nanómetros. La luz con mucha energía que no podemos ver se denomina luz ultravioleta. Esta luz es responsable de la parte dolorosa del verano: las quemaduras. La luz infrarroja es radiación cuyas ondas son demasiado largas para nuestro rango de percepción óptica, pero que sentimos como calor en la piel.





Llamamos longitud de onda a la distancia entre los puntos más altos de las ondas. El espectro de luz visible se mueve entre 380 y 750 nanómetros.

Estos son los fundamentos para hablar de fluorescencia. La fluorescencia es el proceso por el cual una radiación electromagnética de alta energía, la mayoría de las veces luz azul o ultravioleta, estimula un electrón brevemente. Es decir, el electrón absorbe esa energía y sube a un nivel de energía superior donde vibra, perdiendo parte de esa energía, y luego vuelve a su nivel de energía original. Al caer, el resto de la energía absorbida se devuelve en forma de luz. Dado que el electrón ya ha perdido una parte de la energía al vibrar, cuando cae emite una cantidad de energía menor que la que ha absorbido al inicio, por lo que la radiación tiene menos energía que antes, de manera que cambia la longitud de onda y también el color de la luz, de modo que la percibimos a simple vista. Sin embargo, el objeto no refleja la luz como suele pasar con objetos de colores, sino que en cambio irradia más luz visible que la que llegó, las cosas parecen brillar con colores de neón, comúnmente en amarillo, naranja, rosa, rojo, verde o morado. Además, nuestros ojos solo ven bien la fluorescencia en la oscuridad, ya que la luz diurna la eclipsa.



Fluorescencia a nivel subatómico: la luz azul eleva un electrón (aquí se muestra en un modelo atómico) a un nivel de energía superior y, poco tiempo después, el electrón vuelve a caer al nivel de energía anterior, y devuelve la energía excedente en forma de luz.

Cuando los animales o las plantas tienen la capacidad de ser

fluorescentes, eso se denomina biofluorescencia. No debe confundirse con bioluminiscencia, son dos cosas diferentes: en la bioluminiscencia, el organismo crea su propia luz con ayuda de enzimas y reacciones químicas. Esto significa que la bioluminiscencia funciona también en la oscuridad total, por lo que es una forma de comunicación muy apreciada en aguas profundas. Por el contrario, la biofluorescencia depende de una fuente de luz y de que el animal tenga la capacidad de la fluorescencia, por supuesto.

Pero ¿qué provoca la luz, exactamente? En los corales, se supone que las proteínas fluorescentes podrían servir como protección solar. Aunque a primera vista pueda parecer lo contrario, los corales no son plantas sino cnidarios, estrechamente relacionados con las medusas. Cientos o miles de pólipos de coral crecen juntos y forman las colonias que conocemos como corales. Sin embargo, sí se parecen a las plantas en dos aspectos: por un lado, casi todos los tipos son sésiles, es decir, que crecen en un sitio fijo y no pueden moverse de ahí y, por otro, viven principalmente de la luz solar indirecta, aunque también comen plancton microscópico con las bocas de sus pólipos. En su tejido viven pequeñas algas unicelulares, las zooxantelas. Gracias a la fotosíntesis, estas algas producen azúcares, una parte de los cuales entregan a los corales y, a cambio, reciben de estos alimentos como amonio y dióxido de carbono, así como un hogar protegido. Por supuesto, los corales, o sus algas, necesitan luz solar para funcionar, aunque una radiación solar demasiado intensa puede dañar ambos seres vivos, y aquí es donde entran las proteínas fluorescentes. A mayor estrés solar, los corales producen más proteínas. Dado que las proteínas convierten la luz ultravioleta en una luz menos agresiva, partimos de la base de que las proteínas protegen los corales como si fueran una crema solar. Además, parecen tener otras funciones. Hace pocos años, se descubrió que los corales que viven en las capas más profundas de los arrecifes tienen una mayor concentración de proteínas fluorescentes que los de aguas más superficiales. Esto fue una sorpresa, porque la intensidad de la radiación solar se reduce cuanto mayor es la profundidad debido a la absorción y la dispersión, por lo que la protección solar no debería ser necesaria a esa profundidad. Sin embargo, un arrecife a 60 metros en el mar Rojo lucía en colores rojos y naranjas cuando se lo irradió con luz azul. La fluorescencia parece tener otra tarea: a esas profundidades, a las que llega poca luz, sirve para precisamente lo contrario: en lugar de proteger de la luz agresiva, se convierte en una longitud de onda que las algas pueden utilizar para realizar la fotosíntesis. Así, las proteínas sirven en este caso como captadoras de luz para poder existir a esa profundidad.

Cuando se supo que los corales podían brillar a tanta profundidad, algunos científicos y científicas y submarinistas desarrollaron a

principios de siglo linternas submarinas con luz azul o ultravioleta para poder sumergirse en ese mundo psicodélico. Bucear de noche por un arrecife de coral iluminado de neón, lo que se conoce como *Fluo Dive*, tiene algo de festival de tecno y es una experiencia que recomiendo encarecidamente a cualquier fan del mar, aunque falte la música. Gracias a ese nuevo equipo también se descubrió que los corales no son los únicos que participan en el festival luminoso: también hay peces, cangrejos o caracoles nocturnos que brillaron en unos patrones de color nunca vistos hasta entonces. En 2014 se intentó por primera vez hacer una estimación de cuántos peces de arrecife podían brillar, sin importar si eran óseos o cartilaginosos, y se encontraron más de 180 especies: peces gato, rayas, peces cirujano, lenguados, peces sapo, agujas mula, góbidos o escorpenas, por nombrar solo algunos de ellos, brillan por completo o solo en ciertas partes, en color rojo o verde, y forman patrones centelleantes. Y eso era solo el principio, desde entonces se han añadido muchas más especies. Sin embargo, los peces no hacen la fotosíntesis, y pueden ocultarse del sol simplemente nadando. Entonces, ¿cuál podía ser la causa de su fluorescencia?

Una investigación demostró que la fluorescencia se da principalmente en peces que disponen de colores y patrones que habitan en los lechos marinos. Se supone que los peces utilizan un camuflaje tan bueno que pueden tener dificultades para encontrar a sus propios compañeros de especie. Esto es práctico para ocultarse de los miembros caníbales, pero dificulta mucho la reproducción. Por eso, la evolución ha creado esas luces tan discretas que no todos los peces pueden ver.

Esta teoría se apoya en los ojos de los peces, por ejemplo. La mayoría de los peces de los arrecifes pueden ver colores, pero los peces con propiedades de fluorescencia tienen filtros amarillos adicionales que funcionan como filtros de paso largo, es decir, que filtran las longitudes de onda cortas, mejorando la percepción de longitudes de onda largas en las que se mueve la fluorescencia. También se han desarrollado esos filtros de paso largo para personas, solo hacen falta unas gafas especiales con cristales amarillos. La teoría de que la biofluorescencia se utiliza para la comunicación se apoya también en la observación de especies de peces lagarto estrechamente relacionadas. Estos distintos tipos de peces lagarto son difíciles de distinguir a simple vista, porque tienen colores y patrones similares. Sin embargo, sus patrones de fluorescencia son tan distintos que resulta mucho más fácil distinguirlos a las personas y, probablemente, también a los peces. En otros seres vivos, se supone que la fluorescencia tiene un papel importante en el camuflaje. Muchos tipos de corales del arrecife brillan, pero también la clorofila verde de las

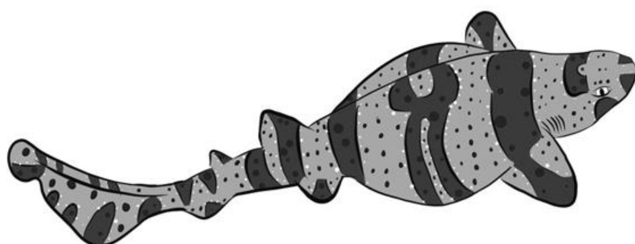
algas que crecen en piedras o en corales muertos brilla en rojo. El ecosistema del arrecife de coral, por tanto, es multicolor. Cuando una persona, que no está dotada de fluorescencia, se encuentra en un arrecife que brilla en verde, es como una araña delante de un foco: una enorme sombra contra un fondo luminoso, lo que hace que sea más fácil de identificar por los cazadores o por las presas potenciales. Por supuesto, siempre que cuenten con filtros amarillos en los ojos, por lo que tener un completo camuflaje fluorescente rojo o verde es una enorme ayuda, algo que se puede ver en especialistas del camuflaje como las escorpenas.

Otro estudio mostró cómo se usa la fluorescencia para atrapar presas: las puntas de los tentáculos de la medusa sombrero de flores (*Olindias formosus*) brillan en verde, y los jóvenes peces damisela y payaso reaccionan a esto como polillas ante la luz, nadando directamente hacia la trampa. La comunidad científica puso a prueba el comportamiento de peces de arrecife respecto a la luz verde jugando bajo el agua con un puntero láser verde. El resultado: muchos tipos de peces persiguieron el punto verde con el mismo entusiasmo que conocemos en los gatos. Por tanto, partimos de la base de que algunos animales marinos fluorescentes, como estomatópodos o anémonas, como los ceriántidos o las anémonas fresa, atraen así a sus presas, aunque la idea no es nueva, porque la gente de la pesca es consciente de esto desde hace tiempo y utiliza cebo fluorescente para capturar ciertas especies de peces.

Para entender mejor la cuestión de la luz bajo el agua y su significado, se ha trabajado intensamente en los últimos años con dos tiburones gato, el tiburón globo (*Cephaloscyllium ventriosum*) y el tiburón alitán mallero (*Scyliorhinus retifer*), que son auténticas bombas de fluorescencia, y serían más que bienvenidos en cualquier *rave*. El tiburón alitán mallero también se conoce como tiburón cadena por el intrincado patrón oscuro que le recorre todo el cuerpo, de color beis claro. Se encuentra en el Atlántico, a lo largo de toda la costa este de Estados Unidos y América Central hasta Nicaragua, y le gusta el agua fría, por lo que vive a profundidades de entre 350 y 550 metros. El tiburón globo, por su parte, vive al otro lado de Norteamérica, en la costa del Pacífico, entre California y el sur de México, a una profundidad de entre 5 y 450 metros. Su piel también cuenta con un patrón oscuro, pero no tan llamativo como el del tiburón alitán mallero, y debe su nombre a otra característica: su estrategia de defensa. Cuando se ve acorralado, traga agua rápidamente hasta que hincha la tripa, se enrosca en forma de U y así resulta más difícil de atacar para sus depredadores.

Todos los que han investigado las propiedades de fluorescencia de estas especies de tiburones han notado que las zonas claras de la piel

tienen una fluorescencia más intensa que las oscuras, que apenas brillan. Además, el tiburón globo consta de manchas circulares fluorescentes en verde que apenas se notan a la luz del día. El tiburón alitán mallero tiene otra particularidad: las hembras presentan un patrón más complejo en el abdomen que destaca más con la fluorescencia.



Un tiburón globo hinchado. Los tiburones globo tragan agua para defenderse de los depredadores. Alcanzan los 100 centímetros.

Los ojos de estos tiburones también se han investigado con microscopios equipados con espectrofotómetros, para poder medir la absorción y reflexión de longitudes de onda. Se ha descubierto un pigmento que absorbe las ondas de luz en un rango de entre 440 y 540 nanómetros, es decir, que los tiburones pueden ver la luz de esa longitud de onda. Precisamente, esa es la longitud de onda en la que se encuentra su propia fluorescencia de azul a verde. Los ojos de los tiburones solo disponen de bastoncillos, por lo que perciben muy bien la luz y están perfectamente adaptados a condiciones de luz escasa, pero son daltónicos. Sin embargo, este pigmento sí les permite ver la luz verde fluorescente.

A partir de estos descubrimientos se formuló la hipótesis de que la luminosidad de los tiburones sirve para poder reconocerse mutuamente aun en aguas profundas en las que apenas penetra la luz. Para poder verificarla y profundizar en los conocimientos adquiridos sobre el pigmento especial de los ojos de los tiburones, se creó una cámara de ojo de tiburón: gracias a unos filtros de paso largo y corto, la cámara es capaz de captar la luz en un espectro de entre 440 y 540 nanómetros, igual que los ojos de los tiburones. Con esta cámara fotografiaron a un tiburón globo en su hábitat natural, tanto con perspectiva humana como con perspectiva de tiburón. En la foto sin filtro, es decir, con la vista de una persona, el tiburón se funde con el entorno gracias a su patrón marrón-beis y apenas se puede distinguir. En la foto con la cámara de ojo de tiburón se ve claramente gracias a la fluorescencia, que aumenta el contraste de su patrón.

En el siguiente paso de ese estudio se investigó más a fondo la piel de los tiburones. Los tiburones son peces cartilaginosos y se diferencian de los peces óseos, entre otras cosas, por su piel. Tienen minúsculas

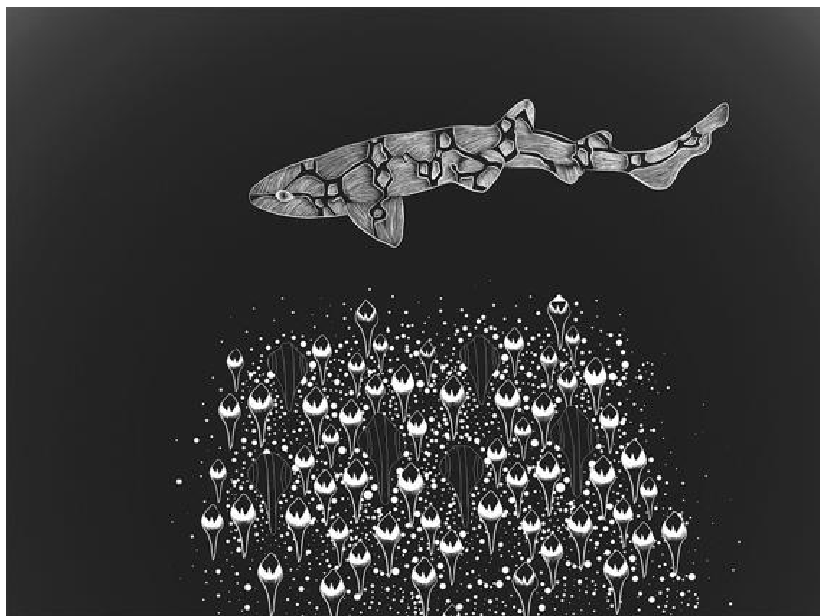
escamas placoideas, parecidas a dientes en su estructura y su composición. Estas escamas están formadas de manera hidrodinámica para minimizar la resistencia al agua al nadar. Esto hace que la piel de los tiburones sea muy lisa, pero, si se acaricia a un tiburón a contrapelo, es decir, de la cola a la cabeza, el tacto es como el del papel de lija. Cuando hay que acercarse a un tiburón, por ejemplo, para medirlo, deja muchas heridas minúsculas, como rozaduras. Quien recuerde las rozaduras de las rodillas de la infancia sabe que no son una lesión mortal, pero sí desagradable. Las *shark rash*, como se conoce a estas rozaduras coloquialmente, son desagradables como una rodilla pelada, y pueden escocer e inflamarse ligeramente cuando no se desinfecta la herida. En resumen: aun sin los dientes de la mandíbula, los tiburones no son la mejor compañía para acurrucarse.

Volvamos al microscopio, con el que se han observado más detenidamente la piel y las escamas diente. En el tiburón globo, solo brilla la piel, no las escamas diente, que crean una sombra clara en comparación con la piel verde fluorescente. En el tiburón alitán mallero, por el contrario, se ilumina tanto la piel como las escamas, que crean una especie de canal lumínico en el que la luz que irradia la piel se agrupa y llega a brillar más claramente aún que en la piel circundante. Entre las escamas diente fluorescentes hay otras más grandes que no brillan, como las del tiburón globo. Esto quiere decir que, como en el caso de las manchas claras brillantes del tiburón globo, la fluorescencia actúa con precisión y las estructuras del tiburón han evolucionado técnicamente para adaptarse a ella. Esto refuerza la idea de que la iluminación tiene una función importante. Otra gran sorpresa fue el descubrimiento de que las proteínas no son las responsables de la fluorescencia, sino que unos metabolitos totalmente nuevos.

Los metabolitos son productos intermedios del metabolismo, en este caso, de la vía del triptófano-quinurenina, en la que el aminoácido triptófano se convierte en la vitamina ácido nicotínico con ayuda de enzimas y en varios pasos en los que se generan los metabolitos de quinurenina. En humanos, esta vía metabólica es importante para el cerebro y el sistema inmune, y las anomalías provocan enfermedades como diabetes, inflamaciones y depresiones. Por ejemplo, en caso de una vía metabólica defectuosa, se crea mucho ácido quinurénico, que impide el acoplamiento de los neurotransmisores glutamato y dopamina en las neuronas; esto puede tener consecuencias graves para la salud, desde falta de concentración y de energía hasta fallos en el aparato locomotor. Por el contrario, los metabolitos de quinurenina de los tiburones tienen una estructura algo diferente de la nuestra, ya que se componen de un átomo de bromo y, a diferencia de los metabolitos humanos, brillan. Mientras que las medusas y los corales usan

proteínas para su fluorescencia, los tiburones y sus metabolitos fluorescentes han desarrollado una estrategia totalmente distinta.

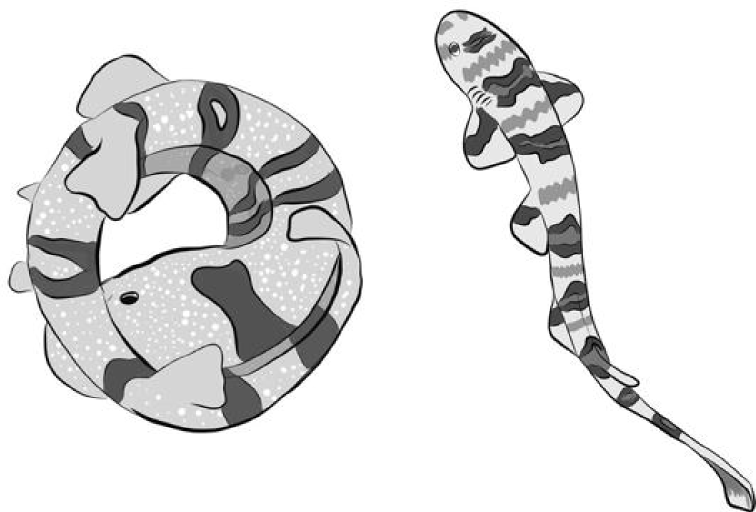
Los tiburones gato, haciendo honor a su nombre, se pasan la mayor parte del tiempo sobre el lecho marino y suelen esconderse en cuevas y grietas. Teóricamente, la falta de movimiento y el contacto frecuente con el suelo los hacían propensos a infecciones por algas y bacterias. Sin embargo, el hecho de que no se vean afectados se atribuye a un metabolito descubierto recientemente: en las pruebas, se ha podido demostrar que estas moléculas tienen propiedades antibióticas. Los estudios realizados en tiburones gato han puesto de manifiesto una vez más que estas capacidades lumínicas no son un capricho de la naturaleza, sino que pueden cumplir diversas funciones.



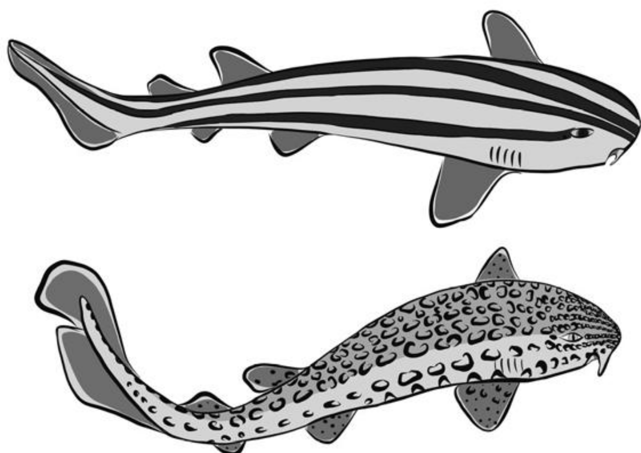
Un tiburón alitán mallero brillando. Solo alcanzan unos 50 cm. Abajo: detalle de las escamas placoides. Las escamas pequeñas forman canales de luz para agrupar la fluorescencia de la piel. Las escamas grandes no lo hacen y destacan como sombras oscuras respecto a la piel brillante.

Quién o qué puede brillar bajo el agua sigue sin estar claro hoy en día. Recientemente, se descubrió por casualidad que también algunas tortugas marinas, tanto la tortuga carey como la tortuga boba, tienen partes del caparazón y de la piel que brillan. El biólogo marino sudafricano Mike Markovina fue uno de los que se quedaron fascinados con el mundo de luces del océano y junto con Jacques Vieira y su equipo del Fluorescent Shark Project South Africa fabricaron una gruesa lámpara de luz azul e iluminaron los arrecifes de Mozambique, los bosques de quelpos de la costa sudafricana, y llegaron a sumergirse de noche en los tanques del Two Oceans

Aquarium de Ciudad del Cabo. A pesar de sus conocimientos previos, les sorprendió la inmensa variedad de luz que encontraron, y se quedaron impresionados con los verdes casi cegadores de las morenas que nadaban frente a ellos, o con una sepia iluminada en azul brillante con ojos fluorescentes en amarillo chillón. Aun así, lo más fascinante es que eran capaces de enviar ondas amarillas fluorescentes por su cuerpo, es decir, una fluorescencia controlada. También observaron un banco de estenopodideos verde amarillo que, de pronto, escupían una nube de una cosa naranja fluorescente. Digo «cosa» porque nadie tiene ni idea de qué es ni de por qué lo hacen. Y no solo los arrecifes tropicales son un espectáculo de luz, también el bosque de quelpos tiene maravillas que mostrar. Debido a la clorofila, los quelpos brillan en rojo oscuro, dando la impresión de ser un bosque encantado místico. Muchos peces también presenta patrones en un tono idéntico de rojo, y otros habitantes del bosque de quelpos brillan en los colores más diversos. Langostas, caballitos de mar, peces pipa, cangrejos, incluso algunas partes de los picos y del plumaje blanco de los pingüinos brillan. El objetivo real de este equipo era estudiar en profundidad las propiedades fluorescentes de los tiburones, para lo que observaron al tiburón gato endémico, es decir, exclusivo de las costas sudafricanas. Bingo: el alitán viperino brilla en verde chillón, el alitán oscuro también, pero con menos fuerza. El abdomen les brilla con tanta intensidad que, cuando nadan por encima de la arena, parece que llevan luces en los bajos. Los tiburones tímidos tienen un nombre muy apropiado, ya que se enroscan como un donut y se cubren los ojos con la cola cuando tienen miedo. Son el número uno en mi lista de tiburones cuquis.



Derecha: el alitán oscuro. Izquierda: el alitán viperino enroscado en sí mismo. Ambas especies alcanzan unos 60 cm de largo. El género de tiburones tímidos solo se encuentra frente a las costas sudafricanas.



Arriba: el tiburón pijama, también conocido como alitán listado, alcanza los 95 cm de largo. Abajo: el alitán leopardo es un poco más pequeño, con un máximo de 74 cm de longitud. Ambos se encuentran exclusivamente en la costa de Sudáfrica.

Contra todo pronóstico, otras dos especies endémicas de tiburones gato, el alitán listado y el precioso alitán leopardo, no brillan en absoluto. Por el contrario, un espécimen muerto y congelado de musola lisa sí lo hacía, y en el tiburón punta negra se descubrieron partes fluorescentes en las aletas.

Todos estos especímenes forman parte de la familia de los tiburones de suelo, pero ¿qué pasa con las especies de mar abierto, los tiburones pelágicos? Por desgracia, hasta ahora no se han podido investigar, ya que la inmersión con equipo de fluorescencia tiene sus retos: por un lado, hay que sumergirse de noche, naturalmente, y eso es mucho más complicado que de día, porque la visibilidad es muy limitada y solo se puede ver la zona que iluminan las linternas. Unos cuantos podrían estar jugando al ajedrez a mi derecha y yo no los vería si no los apunto con la luz. Además, las linternas de luz azul suelen tener un cono muy estrecho, por lo que los animales ágiles como los tiburones pelágicos pueden esquivarlas fácilmente. Por otro lado, la luz azul resulta extremadamente atractiva para las vermiculitas, y se meten por las orejas e incluso por las gafas de buceo. Las sardinas también parecen tener debilidad por la luz azul y se lanzan hacia ella. Recibir un golpe en la cabeza de un banco de sardinas no suele ser agradable para los buzos, así que la única solución es apagar la luz. Mike Markovina sigue investigando la biofluorescencia, pero, independientemente de qué brille, a él le resulta mucho más

interesante qué puede ver esa luz o, mejor dicho, qué tiburones pueden verla, y cómo aplicar ese conocimiento de la mejor manera posible para protegerlos de la sobrepesca y otros peligros. Su idea: una red de pesca fluorescente que los tiburones podrían ver y evitar, mientras que el resto de peces seguiría cayendo en la red. Esto podría salvar una gran cantidad de tiburones que acaban como capturas accesorias.

Aún hay que realizar estudios adicionales para demostrar todas estas hipótesis y muchas otras relativas a la fluorescencia en el mar y su función para la caza, el camuflaje y la comunicación, pero, si reflexionamos, tiene sentido que no sea una propiedad casual, sino que cumpla una verdadera función, ya que los colores de los arrecifes y de los peces tal y como los vemos en los documentales no son reales. Cuando las imágenes no se pueden captar a pleno sol a un par de centímetros de profundidad en el techo de los arrecifes, han de conseguirse con ayuda de potentes lámparas, son estas las que logran iluminar los arrecifes con tantos colores, de lo contrario, todo sería bastante turquesa. Es tan sencillo como que el agua, al menos el agua limpia, es azul, porque absorbe luz y, por eso, a las ondas de luz les cuesta llegar a las capas más profundas del mar. Sin embargo, cuanta más fuerza, es decir, energía, tengan las ondas de luz, más penetran. Así, la luz roja, que tiene poca energía, se queda en el agua superficial: a pocos metros de profundidad, el rojo brillante no es más que un marrón oscuro. Por el contrario, el azul tiene mucha energía, por lo que puede penetrar mucho más en el agua. Por eso es de un azul tan intenso en el fondo, antes de que todo se vuelva oscuro. Aquí vuelven a aparecer las proteínas y moléculas de la fluorescencia, que usan esa luz azul llena de energía para crear luz de otros colores. Gracias a la fluorescencia, los animales pueden llevar otros colores, como el rojo, al mundo azul monocromo y aumentar el contraste; les abre un gran número de posibilidades nuevas, y también a los humanos, puesto que las moléculas fluorescentes son de gran interés para la biotecnología. Especialmente las de los tiburones pueden abrir nuevas opciones para aplicaciones de biología celular, y podrían ser útiles también en otras áreas totalmente diferentes.

El *fouling* o la biocorrosión, como se conoce al crecimiento de algas, bellotas de mar, caracoles y similares en los cascos de los barcos o en instalaciones marinas, es un gran problema para la industria. Actualmente, muchos medios para luchar contra ella están prohibidos porque resultan venenosos para el medioambiente, por eso siempre es están buscando alternativas más ecológicas. Por ejemplo, se ha demostrado que las proteínas fluorescentes de los corales sirven como medio natural contra el crecimiento de algas y pueden usarse para ello. Debido al aumento de la resistencia a los antibióticos, la

medicina también busca alternativas, y las propiedades antibacterianas de las moléculas fluorescentes de los tiburones podrían ser decisivas. Una cosa está clara: además del puro conocimiento y la fascinación por el psicodélico mundo multicolor del océano, este tema reúne un gran potencial para ideas innovadoras y muchas posibilidades de aplicación. Esperemos que no tarden treinta años en usarlas, como sucedió con la GFP.

Criaturas ancestrales

La edad es un tema que nos preocupa mucho, porque nadie quiere envejecer. No solo queremos conservar la belleza y el atractivo de la juventud, también la salud y la forma física. Solo queremos parecer mayores cuando somos menores de dieciocho y nos maquillamos o le quitamos el carné de identidad a nuestro hermano o nuestra hermana mayor para intentar entrar a la discoteca o el cine. A veces funciona, a veces no. ¿Es porque el portero de la discoteca simplemente te ha dejado pasar, o lo has engañado de verdad? Cualquiera que haya tenido que comprobar documentación sabe que no es tan fácil estimar la edad. No quiero saber a cuántos menores de edad dejé entrar sin querer a ver películas de terror *gore* cuando controlaba la entrada a un cine. Así pues, no es de extrañar que existan problemas a la hora de estimar la edad de los animales y que a veces se den errores. Un buen ejemplo es la edad de los tiburones y rayas, ahí nos equivocamos mucho.

El método clásico para determinar la edad del tiburón es parecido al del árbol, contar los anillos de crecimiento de las vértebras de la columna. Por desgracia, este método funciona a medias, ya que esos anillos de crecimiento dejan de formarse de manera fiable a medida que se envejece, o se fusionan y no es posible distinguirlos bien. Un método mejor para contar anillos de crecimiento es marcar a los animales con un fluorescente: se inyecta en el tejido muscular un colorante que se acumula en el tejido cartilaginoso y hace visible en la columna vertebral el momento en que se inyectó. Cuando se vuelve a capturar el mismo tiburón cierto tiempo después, cinco años, por ejemplo, en los anillos de crecimiento puede verse cuándo se marcó, y así se sabe que ese crecimiento corresponde a cinco años. Esto se puede extrapolar a los demás anillos de crecimiento para calcular la edad. No obstante, en los últimos años se ha descubierto gracias al método *Bomb Pulse* que la edad de los animales se había subestimado.

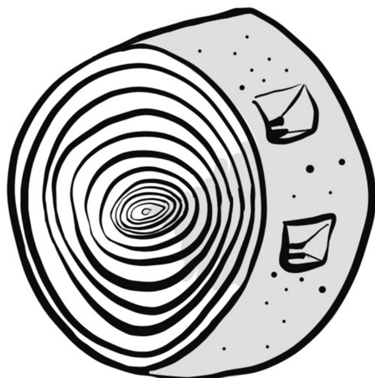
La mayoría habrá oído hablar del método de radiocarbono para determinar edades. El isótopo radioactivo de carbono ^{14}C está disponible en la atmósfera en pequeñas cantidades en comparación con el ^{12}C, en una proporción de $1:10^{12}$ aproximadamente. El isótopo se crea de forma natural cuando la radiación cósmica choca con los átomos de nitrógeno. A través de la fotosíntesis, las plantas absorben CO_2 de la atmósfera, que también contiene pequeñas cantidades de ^{14}C. Por ejemplo, cuando una persona muere, deja de alimentarse y, por tanto, no absorbe más ^{14}C. Dado que el ^{14}C es radioactivo, es decir, inestable, los átomos empiezan a descomponerse lentamente. El ^{14}C

tiene una vida media de unos 5.730 años: eso es lo que tardan en descomponerse la mitad de los átomos de ^{14}C. La otra mitad tarda otros 5.730 años en descomponerse, y así sucesivamente hasta que se pierde el rastro del ^{14}C después de unos 50.000 años.

Si se dispone de un ejemplar bien conservado, como el caso de la momia de Ötzi, se puede usar la concentración de ^{14}C de los tejidos para determinar cuándo vivió esa persona con una precisión de un par de cientos de años; en el caso de la momia de Ötzi, hace unos 5.200 años. Se trata de un método fantástico, pero que funciona solo con especímenes muy antiguos y no se puede utilizar para determinar la edad de los animales que en comparación viven muy poco. El procedimiento *Bomb Pulse*, que en castellano se podría denominar «pulso de bomba», es una forma derivada del método del radiocarbono que se puede usar para determinar edades con precisión. Curiosamente, lo usamos gracias a la Guerra Fría: en los años 50 y 60, Estados Unidos y la Unión Soviética realizaron más de 500 pruebas de bombas atómicas en superficie, y esto duplicó la concentración de ^{14}C radioactivo en la atmósfera. Cuando en un organismo se dispone de las estructuras que se forman al principio de la vida (los dientes son un buen ejemplo), se puede analizar la concentración de ^{14}C en esas estructuras para determinar el año de formación y, con él, la edad.

El *Bomb Pulse* fue una revolución a principios de siglo. Gracias a él, se pudo demostrar que las neuronas no se renuevan, pero los adipocitos sí, contra todo pronóstico. También tiene una gran relevancia forense, ya que permite determinar la fecha de nacimiento de personas fallecidas, lo que tuvo un papel decisivo en la identificación de las víctimas del devastador tsunami del océano Índico de 2004. También resulta muy útil para la difícil tarea de averiguar la edad de tiburones, rayas y otros peces.

Cuando se validó por primera vez la edad de los tiburones con este método, se reveló que la mayoría de las especies son mucho más antiguas de lo que se pensaba. Contar los anillos de crecimiento funciona muy bien durante el primer tercio de la vida de los animales, luego se vuelve menos fiable, tanto que la edad estimada de algunas especies llega a ser el doble. De media, el 30 % de las 29 especies de tiburones investigadas eran unos dieciocho años mayores de lo que se había valorado. Por ejemplo, la esperanza de vida estimada para el tiburón blanco pasó de 40 a 70 años, convirtiéndolo en uno de los peces cartilaginosos más longevos del planeta.



Columna vertebral de un tiburón con anillos de crecimiento. Los anillos de crecimiento suelen ser difíciles de ver a simple vista, por eso se usa la tomografía o la radiografía para verlos mejor.

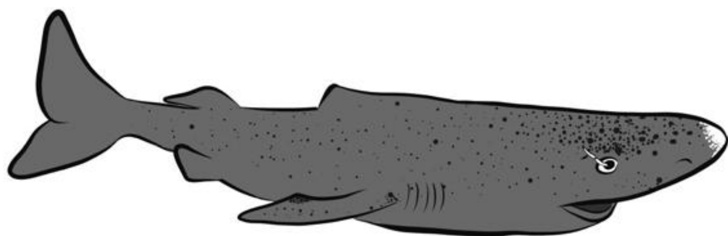
Gracias al *Bomb Pulse*, se descubrió también al vertebrado más antiguo del mundo: el tiburón de Groenlandia (*Somniosus microcephalus*). Se trata de un tiburón muy sosegado, que vive en el Atlántico norte y avanza a una velocidad de 1 kilómetro por hora. Antes ya se suponía que esta especie era muy longeva, pues los tiburones de Groenlandia alcanzan los cinco metros y solo crecen un máximo de un centímetro al año. Por desgracia, no se pueden contar sus anillos de crecimiento, porque estos animales no forman tejido calcificado alrededor de la columna vertebral y, por tanto, no tienen anillos de crecimiento.

En su lugar, se ha investigado el cristalino de sus ojos, que se forma en estado embrionario e incluye en la huella de ^{14}C el año de nacimiento del animal. Se han analizado varios ejemplares de distintos tamaños atrapados como captura accesoria. En este caso, solo se pudo aplicar el método *Bomb Pulse* en los animales más jóvenes, porque el pico de ^{14}C, que es lo que se usa, solo aparece en animales nacidos después de 1950. Y resulta ser verdad que el tamaño está relacionado con la edad, lo que quiere decir que el ejemplar más grande del estudio, de 5,02 metros de largo, debía tener entre 272 y 512 años. ¡Una edad impresionante! A pesar del amplísimo margen que da como resultado el análisis por radiocarbono, incluso la edad mínima convierte a ese animal en el vertebrado más antiguo de la Tierra. Imagina: ese tiburón ya vivía cuando aún nadie se había planteado la revolución en Francia. A lo mejor ya nadaba lentamente por las frías aguas del norte mientras la guerra de los Treinta Años arrasaba Europa.

Esa enorme esperanza de vida significa también que estos animales llegan a ser sexualmente maduros y a reproducirse alrededor de los 150 años, lo que los convierte en víctimas fáciles de la sobrepesca. Antiguamente, se capturaban para vender el aceite de hígado de tiburón. Desde los años 60, ya no se pescan intencionadamente, pero

siguen siendo una captura accesoria habitual en la pesca de arrastre. No se sabe con seguridad qué implica esto para su población, porque no sabemos cuántos tiburones de Groenlandia hay nadando por ahí.

Para gestionar de forma sostenible la pesca, es muy importante determinar correctamente la edad de los tiburones, porque esto permite estimar la productividad de las poblaciones de peces. Los fallos en la determinación de la edad pueden provocar que las poblaciones sufran mucha presión y la reproducción no sea suficiente, hasta el punto de entrar en la lista de especies en peligro. Un ejemplo clásico es el reloj anaranjado (*Hoplosethus atlanticus*), que se ha pescado intensivamente desde finales de los años 70. Entonces, se le suponía una esperanza de vida de 30 años, pero a mediados de los 90 se demostró que la esperanza de vida del reloj anaranjado es más bien de unos 150 años, y los animales tardan probablemente más de veinte años en alcanzar la madurez sexual. Este error en la estimación y la sobrepesca llevó casi a la extinción de las poblaciones de Australia y Nueva Zelanda, y ambos Gobiernos prohibieron la captura de la especie en 2008. Actualmente la población se ha recuperado y se puede volver a pescar, el reloj anaranjado neozelandés incluso lleva el sello MSC de pesca sostenible. Aunque organizaciones como Greenpeace y WWF tienen serias dudas sobre si dicho sello está justificado.



Los tiburones de Groenlandia viven en el Atlántico norte y en el océano Ártico, a unos 1.800 metros de profundidad. Se alimentan de peces, pero también de mamíferos, como las focas. El tejido de estos tiburones contiene una concentración alta de n-óxido de trimetilamina, un compuesto químico que actúa como protección contra el frío y que ayuda en la regulación de la flotabilidad y de la presión en aguas profundas. Casi todos los ejemplares tienen parásitos de copépodos (*Ommatokoita elongata*) en los ojos, a los que se adhieren alimentándose de la córnea y la conjuntiva. Esto supone un perjuicio para la visión de los tiburones, pero parecen compensarlo con otros sentidos, como un sentido del olfato muy desarrollado.

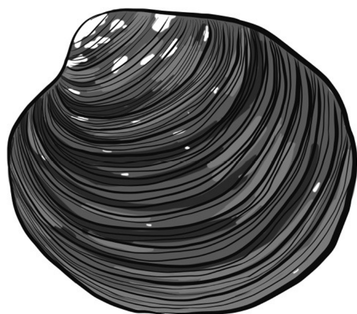
El método *Bomb Pulse* ha permitido grandes avances en la investigación en ciencias marinas, aunque es probable que no se pueda seguir usando en seres vivos nacidos después de 2030, cuando la concentración de ^{14}C en la atmósfera volverá a los niveles de 1950. Otro inconveniente es que para realizar una datación con este método, igual que con el método de los anillos de crecimiento, es necesario

matar a los animales, y eso es algo que se quiere evitar cuando se investiga la dinámica de edad de una población.

Por eso es importante trabajar más con métodos de marcado, con los que se captura a los tiburones, se miden y se pesan y se los marca con una pequeña etiqueta de plástico antes de liberarlos. El marcado permite seguir el crecimiento a lo largo de los años. Por supuesto, este método es laborioso, requiere mucho tiempo, paciencia y algo de suerte para volver a capturar a los ejemplares marcados, pero no cuesta vidas. Con los datos ya obtenidos sobre la edad de los tiburones, debería ser posible entender mejor la relación entre edad y crecimiento para sacar conclusiones sobre la edad de un animal en base a su tamaño.

En las frías aguas del océano Glacial Ártico se pueden encontrar otras muchas criaturas ancestrales. La almeja de Islandia (*Arctica islandica*) es conocida porque no es raro que alcancen los doscientos años de edad. Incluso con esas cifras, fue toda una sorpresa cuando una expedición de Islandia encontró un ejemplar de 507 años de edad, nacido en 1499: Américo Vespucio, el primer europeo en llegar a América oficialmente, y a quien está dedicado el continente, podría haber navegado por encima de ella si se hubiera desviado un poco al norte.

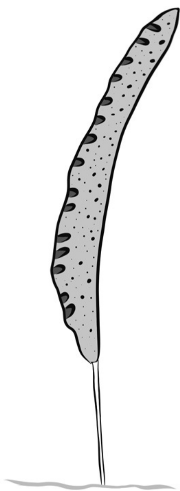
La edad de la almeja se puede determinar con mucha precisión y fiabilidad gracias a los anillos de su concha, por lo que, de momento, tiene el récord Guinness del animal más antiguo de la Tierra. En el caso del tiburón de Groenlandia, el margen de estimación es demasiado amplio, por lo que no ha podido desbancar a la almeja. Sin saber lo que había descubierto, el equipo de expedición congeló la almeja nada más encontrarla, algo a lo que el animal no pudo sobrevivir. Quién sabe si podría haber alcanzado aún más edad.



La almeja de Islandia (*Arctica islandica*) puede parecer insignificante, pero un ejemplar llegó al Libro Guinness de los Récords con ciento siete años de edad.

La mayoría de la gente ve las esponjas como esos utensilios de plástico para limpiar el fregadero o la bañera. Los seres vivos que dan nombre a dichos utensilios se encuentran mayoritariamente en el mar, se

desarrollaron hace unos 800 millones de años y apenas han cambiado desde entonces. Se trata de animales simples, sin órganos ni células musculares o nerviosas, que crecen fijos al suelo y suelen parecer jarrones panzudos. Sus paredes tienen muchos poros que filtran el agua y les permiten alimentarse de plancton microscópico. Para mayor estabilidad, cuentan con un esqueleto hecho de pequeñas agujas, o espículas, que forman un tejido denso; las espículas están hechas de cal o de dióxido de silicio (lo que antes se conocía como tierra silícea). La esponja vítrea *Monorhaphis chuni*, que se encuentra en aguas profundas, puede alcanzar los tres metros de alto. Su esqueleto se compone de una única espícula, larga y de diez milímetros de grosor, que se ancla al lecho marino y crece a lo alto. Si se toma una sección de esta espícula, puede encontrarse también una estructura similar a los anillos de crecimiento que, por desgracia, no se corresponde con años reales, de modo que no se pueden contar para descifrar la edad de la esponja, sino que una vez más hay que recurrir a los isótopos. Dado que el dióxido de silicio (SiO_2) solo se compone de oxígeno y silicio, el método del radiocarbono, que depende del carbono, no funciona. Menos mal que existen isótopos del oxígeno, como el ^{18}O. El ^{16}O es el isótopo más abundante en la atmósfera y el agua, con más del 99 %, pero el ^{18}O supone un pequeño porcentaje. La concentración de ^{18}O en el agua depende de la temperatura, por lo que se puede determinar a partir de la misma. Además, se da la circunstancia de que la temperatura en aguas profundas no sufre grandes variaciones y se mantiene estable durante mucho tiempo. Actualmente, se encuentra en 4 °C. El porcentaje de ^{18}O en el esqueleto de esponja más antiguo analizado reveló que tuvo que crecer con una temperatura del agua de unos 2 °C. La temperatura de las aguas profundas del mar de China Oriental, donde vivía la esponja, era de unos 2 °C a finales de la última glaciación, hace unos 150.000 años. Por tanto, se pudo determinar que la edad de la esponja se encontraba entre 8.000 y 14.000 años.



Las esponjas vítreas de la especie *Monorhaphis chuni* viven a una profundidad de entre 1.000 y 2.000 metros, crecen muy lentamente y su esqueleto, una espícula larga, se engrosa unos 140 micrómetros cada mil años.

En otro estudio de 2017, se encontró un ejemplar de entre 17.000 y 18.000 años, que hizo que la vida del tiburón de Groenlandia pareciera un suspiro. En caso de que eso te haya impresionado, aún hay algo mejor: los científicos encontraron algo sorprendente en el lecho marino de la corriente del Pacífico sur. Esta región entre Sudamérica y Australia se conoce como un desierto de agua muy hostil a la vida, en el que la falta de polvo o de aguas profundas que puedan aportar nutrientes y minerales a la superficie hace que no haya apenas plancton, y sin plancton no hay mucho que hacer. El agua es sorprendentemente clara y de un azul arrebatador, lo que no les vale de mucho a los peces hambrientos, pero que es una verdadera maravilla contemplar. Principalmente, el sedimento del lecho marino es muy rico en microorganismos, tanto, que allí se encuentra hasta el 45 % de la biomasa microbiana mundial. Los microorganismos no solo viven en el suelo sino también en las capas más profundas del lecho. Lo que se denomina biosfera profunda se conoce desde hace poco; en las primeras perforaciones para investigar los cementerios de residuos radiactivos se descubrió que los microorganismos se atrincheran en lo profundo de la corteza terrestre. Ahora sabemos que hay vida hasta a 3,5 kilómetros de profundidad en la corteza. Cómo soportan esos microorganismos las extremas condiciones de vida y la escasez de nutrientes es otra de las preguntas sin respuesta de la ciencia. Para poder estudiar a fondo tales cuestiones, se recogieron núcleos de perforación del lecho marino de la corriente del Pacífico sur. Se llegó hasta los 75 metros de profundidad; dado que las partículas en las aguas profundas del océano se almacenan y acumulan muy lentamente, el sedimento a esa profundidad se formó hace 101

millones de años. En esa época, en mitad del Cretácico, la Tierra era el territorio de los dinosaurios. La intención era averiguar si seguía existiendo vida microbiana después de tantísimo tiempo y el hecho es que, incluso en ese sedimento tan antiguo, había bacterias que volvieron a la vida después de una incubación con nutrientes en forma de compuestos de carbono, aminoácidos y amonio: no solo se lanzaron a devorar la comida, sino que pudieron reproducirse dividiéndose. Esto significa que, a pesar de la falta extrema de nutrientes, pudieron aguantar y «despertar» en cuanto encontraron alimento.

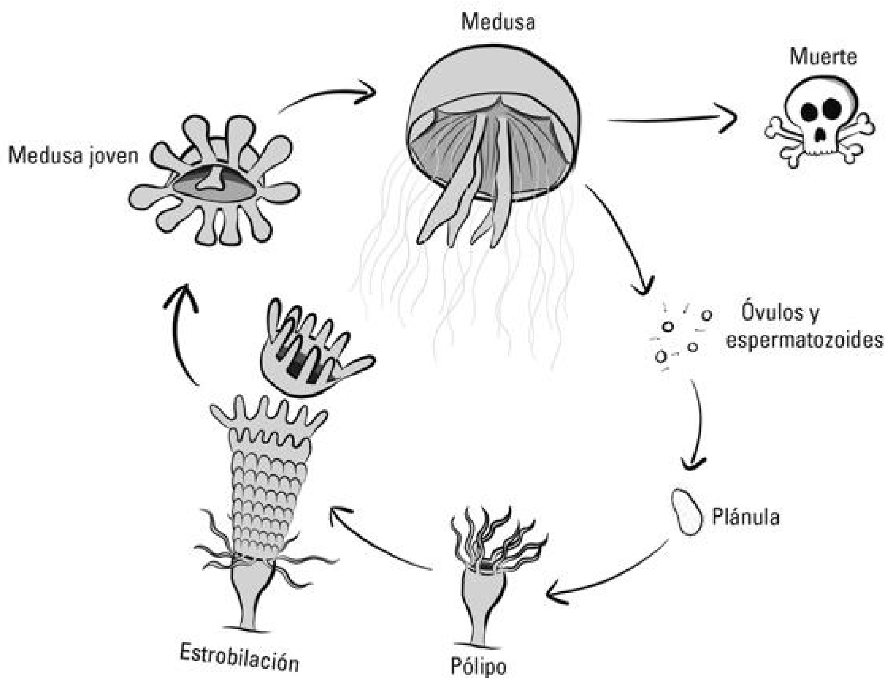
Una posible explicación a la capacidad de resistencia de las bacterias durante tanto tiempo podría ser su metabolismo extremadamente ralentizado: cuando el metabolismo es casi 10.000 veces más lento que el de los parientes de la superficie, se ahorra mucha energía. Otra posible estrategia podría ser que las bacterias hubieran formado lo que se conoce como endosporas. Algunos tipos de bacterias son capaces de convertirse en endosporas cuando las condiciones de vida son inadecuadas, por ejemplo, cuando falta alimento. Como esporas, están totalmente inactivas, y la capa de espora, formada a su vez por varias capas, protege la bacteria en estado vegetativo de condiciones límite de calor, frío, desecación, radiación ultravioleta o valores de pH extremos. Para nuestra desgracia, también algunos gérmenes patógenos tienen esta propiedad, como el *Bacillus cereus*, que vive en productos que no se han calentado lo suficiente y nos puede causar una intoxicación alimentaria. Sin embargo, según sabemos, muchas de las especies de bacterias encontradas en el sedimento no son capaces de formar endosporas, por lo que aquí podría intervenir un mecanismo aún desconocido totalmente distinto.

El agua fría, un metabolismo lento y la hibernación parecen ser la clave para una vida larga. Vivir muchísimo lenta y fríamente suena un poco aburrido e incómodo, de todos modos, algo que no le llama nada la atención a la pequeña medusa *Turritopsis dohrnii*, que vive en las cálidas aguas del Mediterráneo, en torno a Italia y Mallorca, como los turistas alemanes. Siguiendo libremente el lema «¡Morir está sobrevalorado!», esta medusa tiene un mecanismo especial que no solo la mantiene eternamente joven, sino que le permite esquivar la muerte, convirtiéndola en inmortal desde el punto de vista biológico. Para entender cómo funciona, tenemos que examinar más detenidamente el ciclo de vida de las medusas.

Las medusas son cnidarios. Lo que conocemos como las típicas medusas, es decir, el gorro con tentáculos, es algo así como su forma adulta y sexual, ya que producen gametos para reproducirse. El acto sexual en sí no tiene nada de espectacular, generalmente se expulsan óvulos y espermatozoides al agua y se fecundan. A partir de ahí se desarrollan larvas o plánulas que se fijan al suelo y se transforman en

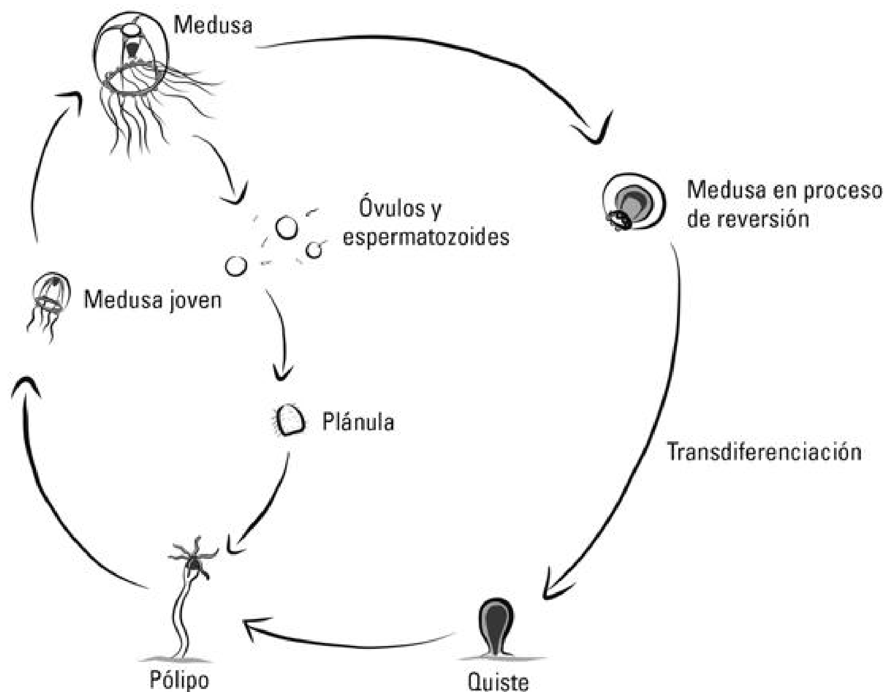
pólipos. Las medusas han cumplido su cometido y mueren después del trabajo bien hecho. Los pólipos recién nacidos viven en el lecho marino y absorben plancton de las aguas con sus tentáculos. En primavera, cuando el agua se calienta, comienza la reproducción asexual, lo que se conoce como estrobilación: generan pequeñas medusas en la cabeza que, tiempo después, se separan nadando. Esas medusas, o éfiras, tendrán que crecer todavía un poco para poder cumplir su tarea de reproducción sexual (en la naturaleza, muchas cosas giran en torno a la reproducción y el sexo). Durante la estrobilación, el pólipo produce varias éfiras que son clones, es decir, genéticamente idénticas. No obstante, una vez que las éfiras se han separado del pólipo, este no muere, sino que puede seguir produciendo nuevas éfiras durante años.

El truco único de la *Turritopsis dohrnii* es que su ciclo de vida es algo diferente: en lugar de morir después de expulsar óvulos o espermatozoides, la medusa vuelve a su forma de pólipo, algo así como volver a la infancia después de haber tenido descendencia. No sería una buena estrategia de supervivencia para nuestra especie, pero a la medusa le funciona de maravilla, porque no solo cambia su aspecto exterior, sino que sus células rejuvenecen al mismo tiempo. En este proceso, que se llama transdiferenciación, las células especializadas, como los cnidoblastos, vuelven a convertirse en células madre que luego pueden transformarse en cualquier tipo de célula. La medusa puede realizar esta evolución a la inversa en cualquier momento. El resultado es que no envejece y es biológicamente inmortal. Es decir, cuando está herida, tiene hambre o las condiciones ambientales no son las idóneas, atrasa el reloj y vuelve al estadio de pólipo.



El ciclo de vida de una medusa. El pólipo forma medusas que se separan de él, eso es la estrobilación. Las éfiras jóvenes crecen lentamente hasta convertirse en lo que conocemos como medusas. Las medusas adultas generan huevos y espermatozoides y luego mueren. Del óvulo fecundado surge una plánula que se fija al suelo y crece hasta convertirse en un pólipo.

No sabemos qué edad ha podido alcanzar la más longeva de estas medusas, pero la edad no es la única causa de muerte a la que debe enfrentarse una medusa. Generalmente, son los depredadores hambrientos que pululan por el mar los que acaban con esa inmortalidad. Sin ellos, el mar sería una gelatina infinita llena de medusas.



El ciclo de vida infinito de la medusa *Turritopsis dohrnii*.
La medusa adulta solo alcanza los 0,5 centímetros de ancho.

Las investigaciones sobre el envejecimiento o la ausencia del mismo en los animales no se llevan a cabo por pura curiosidad o para establecer nuevos récords Guinness, también tienen otras utilidades, como la ya comentada de planificar una pesca sostenible. Además, esas criaturas ancestrales, como las almejas o las esponjas, se pueden utilizar como testigos para examinar épocas pasadas y aprender más sobre sus condiciones ambientales. ¿Cómo se han modificado el clima, la temperatura del agua y las composiciones bioquímicas a lo largo del tiempo? Las respuestas a estas preguntas están ocultas en sus esqueletos y conchas. Así, nos ayudan a conocer mejor la historia de nuestro planeta y a hacer predicciones sobre el cambio climático y sus consecuencias.

Por supuesto, la longevidad o incluso la inmortalidad de los animales son interesantes sobre todo para encontrar el Santo Grial: ¿cómo podemos alargar nuestra propia vida o, por lo menos, conservar la juventud?

Para ello, primero debemos entender por qué envejecemos, y las causas están en nuestras células. El envejecimiento celular tiene distintos motivos: a lo largo de nuestra vida, las células se ven sometidas a distintos tipos de estrés, y ese estrés puede dañar nuestro ADN, lo que puede provocar mutaciones, roturas en la hélice doble o roturas en la cadena, que se vuelve a unir por sitios erróneos. Para que

todo ese estrés no provoque demasiado daño, la célula cuenta con muchos mecanismos de reparación. El acortamiento de los telómeros determina cuántas veces se puede dividir una célula. Los telómeros son secciones de ADN que actúan como capuchones de protección en los extremos de nuestros cromosomas y que se acortan un poco con cada división celular. La longitud de los telómeros influye directamente en la cantidad de veces que una célula se puede dividir. Este fenómeno se conoce también como el «límite de Hayflick»; en los humanos, el límite está en unas 52 divisiones celulares aproximadamente.

Las células madre no tienen esa limitación en cuanto a divisiones gracias a la enzima telomerasa, que vuelve a generar los telómeros. Suena bien, pero una telomerasa activa en otros tipos de células, es decir, que no sean madre, puede provocar crecimientos descontrolados y derivar en cáncer. No es el manantial de la eterna juventud.

Los fallos en la formación de proteínas también juegan un papel en el envejecimiento celular. Las proteínas son largas cadenas de aminoácidos plegadas sobre sí mismas, y solo pueden realizar su función correctamente cuando están plegadas correctamente. Un fenómeno común en enfermedades degenerativas, como el Alzhéimer o el Párkinson, es la concentración de proteínas plegadas incorrectamente. También los orgánulos, es decir, las distintas partes de la célula que están rodeadas por una membrana, como el núcleo celular o las mitocondrias, se ven afectados por el proceso de envejecimiento. La lámina nuclear, una capa de proteínas en la pared interior de la membrana nuclear, se utiliza como biomarcador del envejecimiento en humanos, dado que las mutaciones en los genes de la lámina nuclear pueden provocar el envejecimiento prematuro de las células.

Los fallos en las mitocondrias, las centrales energéticas de las células, repercuten igualmente en el envejecimiento. En las mitocondrias se realiza la respiración celular, que también está implicada en el proceso de envejecimiento, puesto que en la respiración celular se generan subproductos conocidos como especies reactivas de oxígeno. Estos oxidantes son altamente reactivos y pueden dañar proteínas, ADN y membranas, por lo que la célula necesita los famosos antioxidantes, tan elogiados en la publicidad, para contrarrestar los efectos negativos de los oxidantes.

Por último, las transducciones de señales en la célula, que regulan el metabolismo, el consumo de energía y la respuesta al estrés, intervienen asimismo en el envejecimiento.

Cuando se compara animales muy longevos, como los tiburones de Groenlandia, con otros parientes que viven menos, lo que llama la atención es que los primeros tienen un sistema de reparación de ADN

mejorado, muestran menor daño celular y genómico y, en general, están mejor protegidos contra el estrés oxidativo y otros factores de estrés, ya que su ADN contiene más genes que trabajan contra el proceso de envejecimiento, o bien dichos genes tienen mutaciones que les permiten trabajar mejor o de manera más efectiva.

Las esponjas están aún mejor equipadas: tienen células madre móviles que transitan por la esponja y cambian las células dañadas de distintos tipos, sustituyéndolas y autoreparándose una y otra vez. En el caso de la medusa *Turritopsis dohrnii*, sus células envejecidas vuelven a convertirse en células madre y de ellas surgen nuevas células especializadas de pólipos.

En la investigación del envejecimiento se ha demostrado que cuanto más simple es un organismo, más puede vivir o autorrepararse. La formación constante de nuevas células conlleva forzosamente el crecimiento. Eso no es problema para una esponja, que simplemente sigue creciendo, o para un pólipo, que se puede dividir cuando es demasiado grande, pero en animales más complejos, el crecimiento ilimitado es un problema que se conoce como cáncer.

La complejidad de nuestro cuerpo, con muchos órganos y tipos de células distintos y sus tareas y propiedades correspondientes, tiene como consecuencia que todas las funciones celulares deben controlarse estrictamente y no podemos regenerarnos rápidamente. La investigación de seres vivos que poseen esta capacidad ha contribuido mucho a entender el proceso de envejecimiento.

Este conocimiento se aplica hoy en día; la investigación de células madre ya ha conseguido éxitos en la lucha contra el cáncer, e incluso ha funcionado la creación de tejidos y órganos en probetas a partir de este tipo de células. Actualmente, se han realizado con éxito estudios clínicos para el tratamiento con células madre de la degeneración macular, responsable de la ceguera relacionada con el envejecimiento. Para alcanzar estos avances biotecnológicos, es importante investigar todo lo posible procesos como la transformación de la *Turritopsis dohrnii* o el proceso de envejecimiento ralentizado del tiburón de Groenlandia. Quién sabe qué secretos ocultos en estos animales podrían hacer avanzar la medicina. En mi opinión, es poco probable que consigamos vencer a la muerte gracias a la investigación, y, como nos han enseñado muchos libros y películas, la vida eterna puede ser más una maldición que una bendición.

El idioma de los delfines

Los antiguos griegos ya estaban fascinados con los delfines: estos mamíferos marinos a menudo aparecen como salvadores en los mitos antiguos, y también eran muy queridos por los romanos. En el s. I, Plinio el Viejo escribió sobre ellos en su *Naturalis historia*, y relató que su fama era casi sobrenatural. Escribió que eran los animales más rápidos del mundo y que podían incluso saltar por encima de los barcos. Podían predecir tormentas, amaban la música y podían bailar. También habló de delfines que luchaban contra cocodrilos en el Nilo, a los que rajaban el vientre con sus afiladísimas aletas dorsales. Incluso contó historias de amistad entre niños y delfines, casi como una versión romana de *Flipper*.

La Europa medieval también vivió una gran fascinación por los delfines, incluso aunque la mayoría de las personas nunca hubiera visto uno con sus propios ojos. Como consecuencia, se realizaron algunas representaciones artísticas más bien oscuras de delfines, como *Arión es rescatado por un delfín*, de Alberto Durero, de alrededor de 1550. El delfín que monta el poeta Arión parece el hijo de una orca y una sirena, con enormes colmillos, escamas, pero también con pelaje hirsuto en la cabeza y la cola. ¿Qué hacer, si no, cuando no se ha visto nunca un delfín y lo único a lo que se puede recurrir es a los delirios de los marineros? Incluso Benjamin Franklin, durante su viaje de Inglaterra a América, quedó impresionado la primera vez que vio delfines, porque en las representaciones eran siempre seres monstruosos y en realidad son unos animales encantadores y elegantes. La tripulación de su barco le dio una explicación tremendamente rara: dado que los delfines eran tan bellos y apetitosos, las mujeres embarazadas querían comérselos nada más verlos; sin embargo, como los delfines solo se podían cazar y comer en alta mar, y dado que se decía que las mujeres a bordo traían mala suerte, nunca tenían la oportunidad de probar la carne de delfín. Para ahorrarles ese deseo insaciable, se representaban los delfines de esa forma horrible. Por tanto, si de pronto tienes ganas de comerte un delfín, quizás sea el momento de hacerte una prueba de embarazo.

Actualmente, los delfines tienen fama de ser criaturas marinas inteligentes, sabias y felices, y eso se lo tienen que agradecer, sobre todo, a John C. Lilly. Lilly era un neurofisiólogo del U. S. National Institute for Mental Health que empezó a trabajar con delfines en los años cincuenta. En realidad, estaba investigando los cerebros de los animales para sacar conclusiones sobre el cerebro humano. Durante su trabajo con delfines, Antonietta, la esposa de Lilly, se dio cuenta de

que los animales habían empezado a imitar el habla humana a través del orificio respiratorio. La observación de Antonietta y su propia investigación convencieron a Lilly de la extraordinaria inteligencia de los delfines, de modo que se puso una meta ambiciosa: enseñar inglés a los delfines para que pudieran comunicarse con las personas. Encontró muchos patrocinadores dispuestos, entre ellos la NASA, que quería utilizar la investigación de Lilly como modelo para una potencial toma de contacto con vida extraterrestre. Con ese dinero, Lilly pudo establecer su tristemente famoso delfinario en una playa aislada de la isla caribeña de Saint Thomas. En la planta baja de la casa había un tanque para delfines excavado en la roca, que albergaba a tres delfines de la especie delfín mular (*Tursiops truncatus*); hasta hoy, la mayoría de estudios se realizan con delfines mulares. Los animales de Lilly eran dos hembras, Sissy y Pamela, y un macho, Peter. La entrenadora de delfines Margaret Howe Lovatt, que quería enseñar el habla humana a Peter, decidió después de un tiempo que tenía que pasar todo el día con el delfín para un trabajo más efectivo. Para ello, se selló la primera planta de la casa y se llenó de agua hasta la rodilla. Podían transportar a Peter desde el tanque a la vivienda y de vuelta al tanque con un ascensor. Así, Peter y Margaret vivieron, trabajaron y descansaron juntos durante varios meses; se desarrolló una relación íntima que en los informes aparece calificada como «amorosa». Uno de los problemas de convivir con un delfín macho es su marcado deseo sexual. Al igual que los humanos, los delfines se masturban y, para ello, les da un poco igual si se trata de compañeros de especie, peces muertos o incluso personas. Como Peter no se concentraba y no podía trabajar en ese estado, Margaret le echaba una mano, literalmente, para poder seguir trabajando en las lecciones. Las crónicas de los medios de comunicación se volcaron en el hecho de que Margaret gratificaba sexualmente al delfín, a menudo dejando de lado la parte interesante del experimento, la enseñanza del habla.

A pesar de su entrega y sacrificio, Margaret hizo muy pocos avances con Peter. Peter podía repetir con su orificio respiratorio palabras que Margaret le decía, como *hello* o *one, two, three*, pero sin dar muestras de entenderlas o de usarlas intencionadamente para expresar deseos. El sonido que hacía Peter era parecido a cuando se intenta pronunciar esas palabras con la boca llena de agua, no se podía pensar en una pronunciación adecuada. Poco a poco, los y las colegas de Lilly empezaron a observar críticamente su escuela de idiomas para delfines. Como Peter no era capaz de comunicarse con el habla humana, llegaron a la conclusión de que el camino correcto era investigar el propio idioma de los delfines. Con el tiempo, los colegas de Lilly se fueron apartando, al igual que los patrocinios, porque su progreso era demasiado lento. En su desesperación por hacer avanzar

el proyecto, Lilly inyectó LSD a los delfines, a pesar de las airadas protestas de Margaret y de sus colegas, con la esperanza de conseguir algo. Sin embargo, los animales no mostraron ninguna reacción a la droga. Poco después, se cerró el delfinario y Peter fue trasladado a un laboratorio privado de Lilly, donde, trágicamente, se suicidó varias semanas después. Los delfines no tienen el reflejo de la respiración, como las personas, sino que tienen que respirar activamente, es decir, que pueden aguantar la respiración y asfixiarse voluntariamente. Se puede discutir sobre si Peter se quitó la vida por el tormento de las malas condiciones de vida en el nuevo laboratorio (allí, las piscinas eran muy pequeñas y los animales apenas podían moverse) o si se suicidó por amor, porque lo habían apartado de Margaret. No obstante, el hecho es que se han observado comportamientos suicidas en otros delfines y orcas en cautividad y, por suerte, esto ha provocado un cambio cada vez mayor en la actitud de la sociedad respecto a los mamíferos marinos. Aunque después del suicido de Peter, Lilly se apartó de los delfines como objeto de estudio y se dedicó a la expansión de la conciencia a través de drogas como el LSD o la ketamina, en sus últimos años reflexionó mucho sobre sus acciones y se arrepintió de sus experimentos anteriores. Se dedicó con pasión a los delfines hasta su muerte y, a pesar de su tremenda transformación en un gurú *new age* al final de su carrera, hizo avanzar como nadie la investigación del lenguaje de los mamíferos marinos.

En general, la investigación de los idiomas en los animales fue un tema candente en los años sesenta, sobre todo se intentó enseñar idiomas a primates, casi siempre inglés. No obstante, debido a su anatomía, los primates son sencillamente incapaces de imitar el habla humana, así que el foco se centró en la lengua de signos o en teclados especiales que reproducían palabras humanas al pulsar los botones. Con esos medios auxiliares, se ha conseguido una comunicación con monos entrenados previamente; no obstante, esto no siempre ha estado bien visto y ha provocado grandes conflictos en la comunidad científica. No es de extrañar, si pensamos en Copérnico, Galileo o Darwin: las teorías que desplazan al ser humano del centro del universo o desentrañan sus particularidades, como el habla, siempre se han recibido con mirada crítica y solo se han aceptado con el tiempo. La controversia en torno a la investigación del habla de los animales alcanzó su cúspide en una conferencia en Nueva York, en los 80. Allí se encontraron lingüistas, psicólogos, no muchos científicos especializados en habla animal, y magos. En efecto, magos. El único objetivo real de esa conferencia era demostrar a la comunidad científica especialista en el habla de los animales que su trabajo de años era una patraña absoluta.

Para ello, fue decisivo el papel de un caballo, un caballo muy famoso

por entonces, de hecho, llamado Clever Hans. Clever Hans había maravillado al mundo con su sorprendente talento para calcular. Cuando su dueño le preguntaba: «¿Cuánto es dos más tres?», Hans arañaba el suelo cinco veces con la pezuña, resolviendo el problema. Más adelante, un psicólogo desentrañó el misterio del caballo maravilla: descubrió que el dueño de Hans le hacía señales involuntariamente. Siempre asentía mínimamente con la cabeza cuando Hans llegaba al número correcto de arañazos con la pezuña y el caballo paraba de arañar en cuanto veía el movimiento de cabeza. Ni siquiera el dueño se daba cuenta de que movía la cabeza, y tampoco el público, porque se trataba de un movimiento de menos de 1 milímetro. Aun así, Hans percibía ese movimiento y, con ese descubrimiento, se desmontó todo un campo de investigación.

La conferencia de Nueva York también sirvió para hacer comprender a los especialistas en el habla de los animales, con ayuda de los magos, que la comunicación con sus animales se basaba exclusivamente en señales inconscientes, igual que en el caso de Hans, y que nunca se daría un diálogo real. Que los monos crearan construcciones como «tigre blanco» para una cebra o «pájaro agua» para un cisne se descartó como una casualidad y se afeó a los responsables que hubieran sobreestimado las capacidades de sus protegidos. La conferencia acabó en una pelea y una turbulenta conferencia de prensa con los únicos especialistas en habla animal, a los que no solo se acusó de influir inconscientemente en sus animales, sino de falsificar los resultados de sus estudios para conseguir dinero para investigación o para su fama personal. La trifulca tuvo consecuencias: los medios para estudiar los lenguajes no humanos se redujeron drásticamente o desaparecieron por completo. Ni siquiera el incipiente movimiento de protección animal, que criticaba duramente el encierro de animales y la experimentación con ellos, veía con buenos ojos ese ámbito de estudio. Aunque la investigación del lenguaje de los animales se encontrara en la cuerda floja en los 80, los conocimientos adquiridos hasta entonces permitieron conseguir las primeras impresiones sobre la evolución del lenguaje. Por ejemplo, la investigación del lenguaje en animales permitió comprender mejor la lengua de signos, y también ayudó en el desarrollo de métodos pedagógicos del lenguaje para niños y niñas autistas o con dificultades en el desarrollo del lenguaje. Actualmente, sigue habiendo personas que se dedican a investigar el lenguaje de los animales, y los delfines, considerados muy inteligentes también hoy en día, siguen en el centro de esa investigación.

Existen varios motivos por los que se considera que los delfines son los animales más inteligentes del planeta, aunque la palabra «inteligencia» es problemática en este contexto. Por un lado, existe un

debate sobre qué caracteriza la inteligencia, incluso en personas, y, por otro, esa denominación implica siempre una comparación con el ser humano, de modo que solo es inteligente quien muestra las mismas capacidades de una persona. Ese es un concepto del que deberíamos deshacernos, ya que los distintos ecosistemas y formas de vivir requieren distintas capacidades y tipos de percepción, siguiendo el dicho «No juzgues a un pez por lo bien que escala un árbol». Por ejemplo, los cetáceos, el orden de las ballenas, que ya se daban hace millones de años en un medio tan distinto a la tierra como el mar, se han desarrollado en términos de biología evolutiva de una manera completamente distinta a la nuestra, que hemos evolucionado en tierra firme. Por eso, se prefiere hablar de capacidades cognitivas que de inteligencia. Entre otras, las capacidades cognitivas comprenden la resolución de problemas, la capacidad de aprendizaje, la memoria, la comprensión social, la empatía, la comprensión de conceptos y la flexibilidad cognitiva. Los delfines, incluidos en el parvorden de los cetáceos dentados, precisamente porque tienen dientes, poseen grandes capacidades cognitivas por distintos factores: tienen el cerebro más grande del mundo animal en relación al peso, después del ser humano. En comparación con el cerebro humano, el del delfín tiene el doble de pliegues y, por tanto, mayor superficie, así como una concentración de neuronas y células gliales hasta tres veces superior. También se ha demostrado que la simple observación del tamaño y el número de células no dice mucho sobre las capacidades cognitivas de un organismo, tiene más sentido examinar con detalle las áreas del cerebro individualmente. Un área muy grande del neocórtex, parte de la corteza cerebral, está especializada en la audición y la generación de sonidos, lo que indica que estas capacidades son importantes en la vida de los delfines. Otras regiones del cerebro, como la ínsula y el córtex del cíngulo anterior, también son grandes. Se supone que estas zonas son responsables de la capacidad de imaginación y, con ello, de estimar de antemano o prever acciones o reacciones, así como ponerse en el lugar de otro; todas estas son propiedades de seres vivos con una vida social compleja.

Además, los delfines son capaces de reconocerse como individuos. Para demostrarlo, se realizó la prueba del espejo con dos delfines hermanos; esta prueba se usaba ya en los años 80 con chimpancés y gorilas. La prueba consistía en colocar un espejo en el tanque de los delfines y observar sus reacciones: ¿lo ignorarían? ¿Se mirarían? ¿Se girarían al llegar a él? ¿Harían ruido? Es decir, cosas que hacen los delfines. Tras unos días acostumbrándose al espejo, se usó óxido de zinc para marcar uno de los laterales de los delfines. El óxido de zinc es conocido por su uso en las cremas solares espesas, que funcionan estupendamente y no resultan venenosas para las personas ni la

naturaleza, pero que no quedan bien. El objetivo de marcar a los animales no era comprobar el sentido de la estética de los delfines, sino ver si les molestaba, como se suponía y como se había observado en chimpancés y gorilas. Los resultados de la prueba del espejo fueron inesperados: la reacción de los delfines daba pie a afirmar que se reconocían en el espejo. Por ejemplo, abrían el hocico y se lo inspeccionaban, o nadaban cerca del espejo para mirarse los ojos. Uno de los hermanos usaba el espejo para jugar, haciendo burbujas de agua que luego cazaba con el morro mirando su reflejo para orientarse. Además, ambos delfines mostraron de forma repentina un comportamiento sexual aumentado, que mostraban principalmente frente al espejo, los muy pícaros. Sin embargo, apenas hicieron caso de la marca blanca, solo cuando los entrenadores se la quitaron con un paño observaron en el espejo el progreso de la limpieza casi con impaciencia. ¿Quizás porque los delfines son vanidosos?

Otro estudio con dos delfines jóvenes mostró que se reconocen en el espejo a partir del séptimo mes de vida; por su parte, los bebés humanos no se reconocen hasta el primer año (también hay que preguntarse aquí si nuestra manera humana de autopercepción es comparable a la de los delfines: dado que los delfines usan otros sentidos, como la ecolocalización —de la que hablaremos más adelante—, es posible que un reflejo puramente óptico tenga efectos distintos a los que tiene en las personas).

Otra característica de estos mamíferos a los que se asignan capacidades cognitivas altas es el uso de herramientas. Obviamente, no al nivel del ser humano, ya que contar con pulgares es una gran ventaja, pero sí usan lo que pueden de formas muy creativas. Los delfines mulares de la Shark Bay australiana usan esponjas para revolver el lecho marino en busca de presas, lo que les permite acceder a una gran variedad de peces escondidos en la arena. Se supone que las esponjas les sirven de protección, para no llevarse golpes en el hocico ni clavarse nada, también es posible que así cubran más superficie. Las crías aprenden este comportamiento de sus madres, pero no todas lo mantienen hasta la edad adulta. Al igual que a las personas nos gusta pasar tiempo con otras personas que tienen intereses similares a los nuestros, solemos encontrar delfines que usan esponjas en compañía de otros delfines con ese hábito en lugar de con aquellos que han abandonado ese comportamiento. En el documental de la BBC *Un espía entre delfines*, se grabaron imágenes de un grupo de machos jóvenes mordisqueando con cuidado un pez globo venenoso y, luego, pasándose el pez hinchado a causa del miedo como si fuera un porro. Más tarde, los delfines se quedaron como atontados en la superficie del agua, con los ojos pequeños y viendo su reflejo en el espejo con alegría. No se ha aclarado científicamente si los delfines

realmente abusaron de los estupefacientes o si simplemente usaron al pez globo como una pelota. Por mi parte, dejo a cada cual la interpretación de si ese comportamiento cuenta como uso de herramientas.

Otra cuestión es que los delfines pueden adquirir idiomas artificiales. Estudios de larga duración con dos delfines hembra, Phoenix y Ake, demostraron que son capaces de aprender lengua de signos y que no solo pueden asignar signos a determinadas cosas o acciones, sino que también entienden las conexiones gramaticales entre las palabras. Por aclarar: la secuencia de signos PELOTA + TRAER + CESTA significa que se pide al delfín llevar la pelota a la cesta. CESTA + TRAER + PELOTA quiere decir lo contrario, llevar la cesta a la pelota. Al final del experimento, los delfines podían entender 30 palabras, con las que podían construir 2.700 frases de hasta cinco palabras. También eran capaces de reaccionar correctamente a frases nuevas o descifrar fases ilógicas. Habían desarrollado una comprensión del concepto de las palabras. Por ejemplo, cuando se les daba una pelota de aspecto distinto o se colocaba un aro en el tanque, les quedaba claro enseguida que esos objetos se asociaban con los signos PELOTA y ARO. Es decir, los delfines son capaces de comprender el concepto así como entender y aplicar secuencias de palabras.

Y, por supuesto, el tema más importante: la comunicación dentro de una especie, el idioma de los delfines. La comunicación verbal de los delfines es de dos tipos: por un lado, están los conocidos silbidos y graznidos, que sirven exclusivamente para la comunicación dentro del grupo y que les permite comunicarse hasta a diez kilómetros de distancia. Como los silbidos tienen un rango de frecuencia de entre dos y 35.000 hercios y, por tanto, están dentro del rango de veinte a 20.000 hercios que es audible para las personas, conocemos estos ruidos como el idioma «clásico» de los delfines.

Por otra parte, están los chasquidos, o clics. Se trata de ondas sonoras de alta frecuencia que se mueven en el rango de entre 20.000 hercios hasta los más de 300.000 hercios del rango de ultrasonidos. Para las personas es casi todo inaudible, pero la parte que podemos oír suele compararse con los golpes de un pájaro carpintero o con una puerta que cruje. Estos chasquidos sirven para la ecolocalización y se utilizan para cazar y para localizar e identificar objetos emitiendo ondas sonoras hacia ellos. Los objetos chocan con esas ondas y el eco que devuelven se registra e interpreta. Debido a su longitud de onda corta, los chasquidos no pueden viajar muy lejos y solo se usan en un área de entre 5 y 200 metros, pero tienen una gran resolución y permiten «ver» el entorno con mucho detalle. Así, los delfines pueden medir el tamaño, la forma, la distancia, la velocidad e incluso el material de un objeto. Por si fuera poco, cuando se focalizan, los

chasquidos se pueden utilizar para aturdir peces durante un breve lapso. Aunque los delfines generan sonidos en un rango de entre 12 y 300.000 hercios, solo oyen en el rango de entre 800 y 100.000 hercios; las ondas sonoras fuera de ese rango se perciben con un órgano de oído especial, el rostrum, que se ubica a lo largo del hocico. Este órgano es tan sensible que un delfín puede encontrar una moneda pequeña sobre una piedra en agua turbia solo usando ecolocalización.

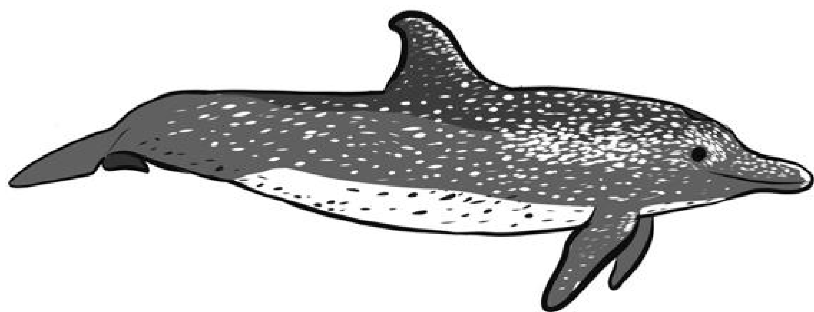
Cuando los chasquidos se emiten como impulsos comprimidos, se habla de *burst pulses*. Cuando se emiten con pausas mínimas entre los chasquidos, dejan de escucharse como clics y parecen un sonido de verdad. Personalmente, a mí me recuerdan al pato Donald refunfuñando, o a un juguete para perros que chirría. Se usan a menudo muy cerca o directamente en contacto con otro espécimen y sirven en la comunicación social, por ejemplo, durante el celo o para disciplinar a los más jóvenes. ¿A lo mejor cuando se pasan con los peces globo?

La comunicación verbal de los delfines es muy amplia. Y además, es muy compleja, porque los silbidos se pueden producir al mismo tiempo que los chasquidos. Lo que se puede concluir al respecto es que esos ruidos se producen en órganos distintos. Los delfines hacen ruidos de una manera distinta a las personas, ya que no tienen cuerdas vocales. La laringe debe permanecer cerrada, de lo contrario podría entrarles agua en los pulmones y eso no sería nada práctico. Por tanto, los ruidos se generan en la nariz, en la que hay determinados órganos como las cuerdas vocales, y cuya función es similar a la de las nuestras. Igual que las personas podemos modular un sonido al mover la boca, los delfines usan los músculos de las fosas nasales para modificar los tonos. En los delfines, la nariz se ha convertido en el espiráculo a lo largo de millones de años. Presuponemos que los silbidos se generan en la fosa nasal izquierda y los chasquidos en la derecha, pero aún hoy no está claro de cómo ocurre realmente.

Actualmente, sabemos que los delfines pueden generar hasta cuatro ruidos distintos de forma simultánea. Las posibilidades de combinación entre estos ruidos significarían que el idioma de los delfines podría tener hasta un billón de «palabras»; por comparar, el inglés se conforma de un millón de palabras. Hasta ahora, los estudios del idioma de los delfines se limitaban principalmente a los silbidos. Sin embargo, seguimos sin tener apenas conocimientos fundamentados al respecto. Una de las pocas cosas que sabemos es que los delfines tienen nombres, lo que se conoce como firmas de silbido. Los delfines jóvenes se dan un nombre en su primer mes de vida, aprendiendo, imitando y modificando los silbidos de su entorno social hasta crear su propia firma, que conservan hasta el final de su vida. Esos nombres se utilizan para presentarse y dirigirse unos a otros, y cada firma es

única. Gracias a las firmas de delfines en cautividad que han tenido que viajar por distintos acuarios por motivos reproductivos, un científico probó si los delfines se acordaban de compañeros anteriores por su firma. Para ello, se reprodujo la firma con un altavoz submarino y se analizó su reacción. El resultado fue que, incluso después de décadas, los delfines se acordaban unos de otros o, por lo menos, de sus nombres. Esa fue la primera vez que se comprobó que un ser vivo (exceptuando a las personas) poseía ese tipo de memoria a largo plazo. Desde el punto de vista de la biología evolutiva, crear recuerdos a largo plazo tiene sentido para los delfines: viven en grupos fijos o manadas, que de vez en cuando se mezclan con otros grupos, por lo que viene bien recordar con quién se llevan bien y a quién es mejor evitar. Saber exactamente quién es la madre de cada cual también ayuda a evitar incestos. Además, parece que los delfines no tienen voces diferenciadas, por lo que no pueden distinguirse acústicamente, lo que hace que el nombre sea imprescindible para saber con quién se está hablando.

Además de los nombres, sabemos muy poco sobre el idioma de los delfines, porque la investigación supone muchísimo esfuerzo. La científica Denise Herzing y su equipo llevan décadas investigando este tema: desde hace 30 años recoge datos sobre una colonia salvaje de delfines moteados del Atlántico (*Stella frontalis*) que vive frente a las costas de Bahamas.

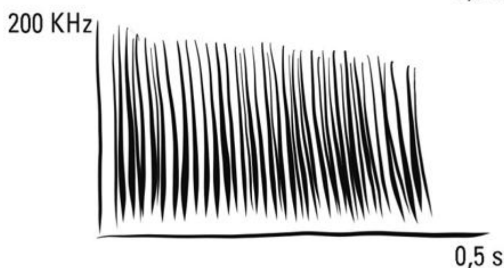


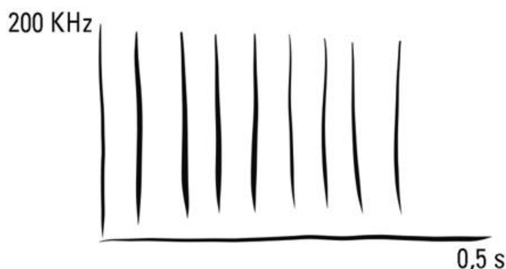
Los delfines moteados del Atlántico tienen ese nombre por sus llamativas manchas. Las manchas surgen con la edad y ayudan a reconocer a los individuos. Los delfines manchados, de hasta 2,5 metros, son más pequeños que los delfines mulares, que pueden alcanzar los 4 metros.

El mar en torno a Bahamas es muy claro, perfecto para grabar vídeos y sonido bajo el agua. Para ello, solo se necesita una cámara submarina con un hidrófono, es decir, un micrófono submarino. El objetivo: analizar la comunicación y el comportamiento de delfines salvajes en su entorno natural. Por un lado, se analizan los ruidos con un sonograma, o espectrograma de sonido, que es un diagrama de tiempo-frecuencia. Representa el rango de frecuencia de los ruidos en el eje Y, el tiempo en el eje X y el volumen mediante el grosor de las

líneas. De este modo, también se pueden ver tonos en rangos de frecuencias que no son perceptibles para las personas. En el sonograma se puede ver claramente la diferencia entre los distintos sonidos, como silbidos, chirridos, chasquidos o *burst pulses*.







Ejemplos de sonogramas de distintos sonidos de delfines. De arriba abajo: silbidos, *burst pulses* y chasquidos. El eje Y muestra la frecuencia en kilohercios, el eje X muestra el tiempo en segundos y el grosor de las líneas muestra el volumen.

Estos sonogramas se analizan junto con el material de vídeo, de modo que se puede ver el comportamiento con sonido. Es interesante ver qué sonido corresponde a cada comportamiento: si a un determinado chillido le sigue un comportamiento agresivo entre dos machos, este sonido se marca como «agresividad». Un silbido entre madre y cría al volver a verse se marca como «saludo», y así sucesivamente.

El análisis de una hora de material de vídeo supone mucho esfuerzo y puede llevar fácilmente diez horas de trabajo, así que no es de extrañar que se retrasen bastante los análisis. Aquí es donde entran las tecnologías modernas: Herzing y su equipo están trabajando ahora con métodos de aprendizaje profundo para analizar los vídeos y

sonogramas de manera automatizada, entrenando algoritmos con juegos de datos seleccionados por una persona para reconocer y anotar patrones en los datos recogidos, de modo que, al final, el ordenador puede encargarse del trabajo. De este modo, el trabajo de anotar, que habría que hacer a mano, se facilita y se acelera mucho, y Herzing y su equipo no solo pueden analizar los datos que han recogido en los últimos treinta años, también pueden buscar nuevos patrones en las secuencias de sonidos que no les habían llamado la atención hasta el momento. Los primeros resultados exitosos de sus esfuerzos demuestran que es útil, por lo que se ha conseguido un nuevo y prometedor desarrollo en la investigación de los delfines.

La comunidad científica no solo observa, también intenta comunicarse activamente con los delfines a través de silbidos generados artificialmente que los delfines pueden imitar fácilmente. En este tipo de comunicación han colaborado especialistas en informática para crear el CHAT, abreviatura de Cetacean Hearing and Telemetry. El CHAT es una especie de intérprete simultáneo portátil, y permite a quien lo use emitir ciertos silbidos pulsando un botón, silbidos que son denominaciones de determinados juguetes que se ofrecen a los delfines, como un chal o un trozo de alga. Además, CHAT puede oír el sonido de los delfines y traducirlo al inglés, de modo que, cuando un delfín imita el silbido de «chal», quien lleva el CHAT oye la palabra *scarf* («chal») por los auriculares. La esperanza es que los animales entiendan esta denominación y pidan el juguete imitando el sonido correspondiente. Así, pueden aprender mientras juegan. Ha funcionado una vez, pero podría ser casualidad, todavía queda mucho juego por delante.

Actualmente, una *start-up* especializada en el reconocimiento de idiomas y la traducción mediante inteligencia artificial se ha subido al carro y está trabajando también para desentrañar el idioma de los delfines, por lo que los próximos años podrían ponerse interesantes en la investigación del lenguaje animal.

El hecho de que no hayamos avanzado mucho después de décadas de trabajo es porque, sencillamente, no es fácil entender un tipo de lenguaje desconocido. Para demostrarlo, cambiemos las tornas y dejemos que un delfín me observe durante un día normal: me vea y me oiga hablar e interactuar con la gente de mi alrededor. También me observa frente al ordenador, escribiendo un correo electrónico, quejándome cuando Internet va demasiado lento. De vez en cuando, cojo un boli y escribo algo en un papel, imprimo algo o, mejor dicho, intento imprimir algo, porque la voluntad de la impresora no suele corresponderse con la mía, así que le pego un grito. Un pájaro llega volando a mi balcón, le saludo con un «hola», nos conocemos, viene todos los días. Gorjea y luego se va volando. Suena el móvil: un amigo

me manda una foto divertida de un gato, me río resoplando por la nariz y vuelvo a dejar el móvil.

Ahora, intentad imaginaros que sois un delfín y tenéis que averiguar qué se comunica ahí y cómo. Seguro que el delfín comprendería el hablar con la gente, es decir, la interacción cara a cara, pero más allá de eso, las cosas se complican. ¿Cómo podría entender el concepto de comunicación escrita cuando en su mundo eso no existe en absoluto? ¿Cómo entender que la comunicación verbal con el ordenador y la impresora es una válvula de escape frente al estrés y que la comunicación real se realiza a través de Internet y de ondas electromagnéticas que no puede percibir? Podría pensar que se da una comunicación interespecie entre el pájaro y yo, aunque solo sea una especie de ritual por la soledad de trabajar en casa. Estoy en contacto permanente con otras personas a través del móvil, pero el delfín podría tener la impresión de que paso todo el día sola, ya que no puede entender que recibo mensajes. Y ¿qué les pasa a los seres humanos con las fotos de gatos?

Lo que quiero demostrar es que la comunicación de los delfines, y también de las ballenas, podría darse de una manera totalmente distinta a la nuestra y resultarnos tan ajena que aún no sabemos dónde y cómo debemos investigarla. El cerebro de los odontocetos lleva ya unos treinta y cinco millones de años desarrollándose y, durante todo ese tiempo, ha podido adaptarse específicamente a las necesidades de vivir en el agua. Por eso, desde el punto de vista de la biología evolutiva, la inteligencia de los odontocetos se desarrolló antes que la humana y de manera distinta; así que no es de extrañar que nos cueste entenderla. En las últimas décadas, la ciencia se ha concentrado sobre todo en los silbidos, que por lo menos podemos percibir, pero los clics también son una parte importante de la comunicación. Algunos investigadores opinan que los delfines y las ballenas utilizan un lenguaje de imágenes sonográficas y que se envían imágenes en 3D realizadas a partir de clics. Por desgracia, esto es casi imposible de comprobar. También hay teorías según las cuales los saltos, la mímica y los golpes de cola sirven para comunicarse y contribuyen a su expresión. Todas estas preguntas abiertas y la potencial complejidad de la comunicación son la causa por la que, probablemente, seguiremos sin poder hablar con los delfines dentro de 50 años. ¡Es una pena! Es un discurso social y ético en el que me gustaría participar. Imaginaos que, de pronto, estos animales pudieran hablar con nosotros, exigir derechos, criticar nuestro comportamiento, advertirnos de las malvadas orcas. También podría ser que estuvieran todo el día hablando de peces y no tuvieran ningún interés por el mundo terrestre. ¿Cómo reaccionaría la humanidad? También es posible que lleguemos a la conclusión de que, simplemente, los

delfines no tienen un lenguaje complejo.

A pesar de décadas de investigación y de la certeza sobre sus capacidades cognitivas, su compleja vida social y sus lazos familiares, aún hay cientos de delfines encerrados en acuarios y exhibidos para entretenimiento humano. Del mismo modo que las personas no son felices en la cárcel, tampoco lo son un delfín o una ballena en un tanque. Lo demuestra una esperanza de vida menor, enfermedades y comportamientos anormales provocados por el estrés crónico que día a día sufren estos animales en cautividad. Del mismo modo que hemos desterrado los zoos humanos y los *freak shows*, tenemos que aprender a garantizar también los derechos y la dignidad de los animales con los que compartimos la Tierra. En Alemania y la UE sigue siendo legal mantener delfines y ballenas en cautividad, pero algunos países como Costa Rica, Bolivia, Chile, Croacia o Grecia ya lo han prohibido. La India ha ido un poco más allá y dio a los cetáceos el estado de personas no humanas en 2013, otorgándoles derecho a la vida y la libertad.

El plástico perdido

En 1997, cuando Charles J. Moore volvía al puerto de salida tras una exitosa regata de Los Ángeles a Hawái, decidió tomar un atajo por el llamado giro del Pacífico Norte. Por el camino, él y su tripulación apenas podían creer lo que veían: miraran adonde miraran veían trozos de plástico, y eso durante días. Moore y su barco estaban a miles de millas náuticas de la costa más cercana, en mitad de la inacabable vastedad del Pacífico; en esa zona del mar es difícil incluso ver otras embarcaciones, ya que los veleros no tienen mucho viento y para los barcos de pesca no hay mucho que pescar por la falta de nutrientes en el agua. ¿De dónde salía entonces toda esa basura?

Lo que entonces fue un descubrimiento asombroso hoy es cultura general: en el Pacífico flota una isla de basura del tamaño de Francia. Aunque los equipos de investigación marina ya se habían dado cuenta décadas antes de que la basura plástica se acumulaba en los mares, el descubrimiento de Moore expuso al público la problemática de la contaminación marítima y, con ello, captó la atención de la ciencia. Esta historia también es un buen ejemplo de comunicación científica fallida, ya que la «isla de plástico» tiene un aspecto distinto al que se pueda imaginar de primeras: en realidad, la basura se acumula en ese giro, pero muchos de los trozos de plástico son muy pequeños, y la acumulación no es ni lo suficientemente densa ni tiene la altura que se esperaría de una isla, por lo que se prefiere hablar actualmente de una «sopa de plástico» cuando se trata de explicar gráficamente el lugar.

Pronto se puso de manifiesto que no solo existe este montón de basura, sino que el plástico se acumula en todos los grandes giros oceánicos. Los grandes giros oceánicos son enormes corrientes circulares que se forman por los vientos y la rotación de la Tierra. Hay cinco en total: además del giro del Pacífico Norte, existe otro en el Pacífico Sur, en el Atlántico Norte y Sur y uno en el océano Índico. Las boyas flotantes equipadas con emisores GPS que miden las corrientes y los parámetros medioambientales, como la temperatura del agua, se pueden usar también para seguir el viaje del plástico por los mares. Dado que flotan en la superficie como lo hacen muchos trozos de plástico, realizan caminos similares a través de los mares. Así se demuestra que el recorrido natural de las corrientes marinas hace que una parte del plástico llegue a los giros y se acumule allí. Según los últimos estudios en el giro del Pacífico Norte, en los que se han usado redes para tomar muestras y aviones para buscar trozos grandes de basura, se estima que la mancha de basura contiene entre 45.000 y 129.000 toneladas de residuos plásticos que ocupan una superficie de

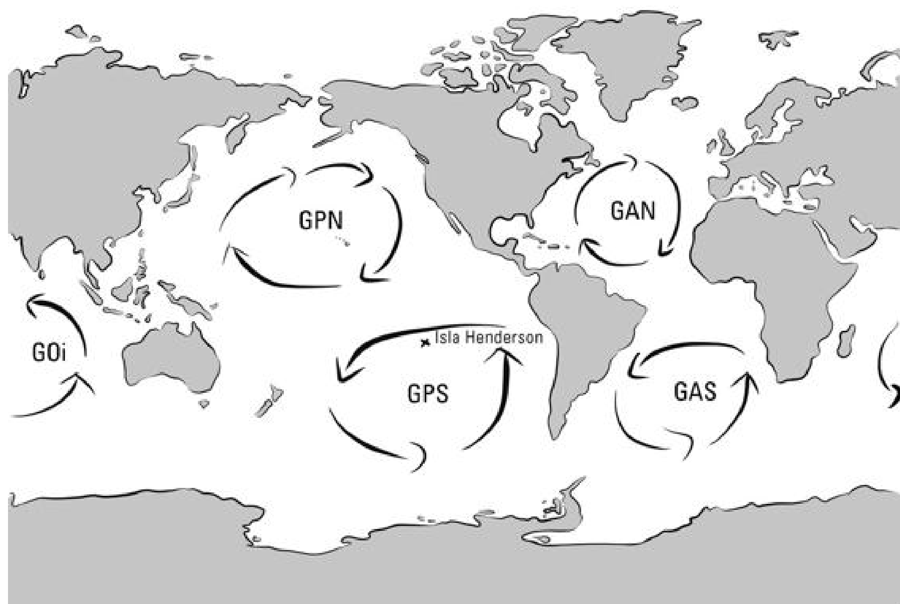
1,6 millones de kilómetros cuadrados, entre cuatro y cinco veces la superficie de Alemania. Otras regiones marinas se ven muy afectadas: actualmente, el Mediterráneo tiene tanta concentración de basura plástica como el giro oceánico. Dado que el estrecho de Gibraltar, la pequeña abertura entre España y Marruecos, deja pasar más agua superficial del Atlántico de la que sale del Mediterráneo, apenas hay fugas, y así es como el Mediterráneo se convierte en una zona de acumulación de plástico. Según las estimaciones, se han acumulado entre 1.000 y 3.000 toneladas de plástico: una concentración que no tiene nada que envidiar a las de los giros. Usando modelos de cálculo con los datos recogidos de todo el mundo, sabemos que hay más de cinco billones de partículas de plástico flotando en la superficie de los océanos, con un peso de más de 260 000 toneladas, pero ¿es realmente todo plástico?

En 2015, la científica Jenna Jambeck y su equipo usaron los datos de basuras de todas las poblaciones costeras para calcular que, solo en 2010, llegaron entre 4,8 y 12,7 millones de toneladas de plástico al mar. Para ilustrar mejor los datos, eso corresponde a una masa de 69 gatos lanzados al mar por segundo; algo que espero que nadie haga. El porcentaje mayor proviene de basura mal tratada, es decir, basura que se ha tirado sin más en cualquier sitio, o basura de vertederos ilegales o mal gestionados, en los que los desechos llegan al medio natural. Con el tiempo, esta basura puede llegar al mar a causa del viento, lluvias, inundaciones, tormentas o ríos. Eso incluye también la colilla tirada en la arena o el envoltorio de la barrita de cereales que se dejó como se pudo en la torre que sobresalía del cubo de basura de la playa y que seguro que no se quedó ahí hasta que se vació el cubo. La mayoría de esa basura es plástico desechable, es decir, cosas que usamos durante muy poco tiempo, como bolsas, cubiertos, envoltorios, botellas, tapones o colillas. Hasta el año 2015, hemos producido en todo el mundo 6,3 miles de millones de toneladas de basura plástica, de la que solo se ha reciclado el 9%, el 12% se ha incinerado y el 79% está en vertederos o desperdigada en la naturaleza. Si no mejoramos el tratamiento de nuestra basura, la cantidad que llega al mar podría multiplicarse por diez para el año 2050.

Además de la impactante cantidad de plástico que tiramos al mar, otro resultado del estudio de Jambeck fue particularmente interesante: en el mar tiene que haber mucho más plástico del que pensábamos, ya que, teniendo en cuenta las 260.000 toneladas en la superficie del océano mencionadas anteriormente, está claro que, aun así, estas son mucho menos que los cinco millones de toneladas, como mínimo, que llegaron al mar solo en 2010. De ahí sabemos que ni siquiera el 1% de todo el plástico que ha llegado al mar en los últimos años flota en la superficie. ¿Dónde está entonces el 99% restante? ¿Puede ser un

problema para el mar y para la humanidad?

La palabra plástico, que usamos habitualmente para referirnos a este tipo de material, viene del griego *plastico*, que quiere decir «maleable», y esa es una de las características decisivas: mediante calor puede adoptar prácticamente cualquier forma imaginable. A esto se añade que es barato de producir, extremadamente duradero, robusto y muy ligero. No es de extrañar que se haya hecho un hueco en nuestras vidas desde los años cincuenta, con tanto éxito que hasta 2015 se habían producido en todo el mundo 8,3 miles de millones de toneladas, lo que equivale a 29 veces el peso de toda la población mundial o, para los amantes de los animales, de 83 millones de ballenas azules.



Los cinco giros oceánicos en los que se acumula el plástico: giro del Pacífico Norte (GPN), giro del Pacífico Sur (GPS), giro del Atlántico Norte (GAN), giro del Atlántico Sur (GAS) y giro del océano Índico (GOI). Dado que los giros están en alta mar, el plástico necesita un par de años para llegar allí. La isla Henderson, deshabitada, está en mitad del giro del Pacífico Sur.

El plástico es una serie de polímeros sintéticos, es decir, uniones de hidrocarburos, que se fabrican principalmente a partir de petróleo. Hay muchos tipos de plástico que se utilizan para distintas aplicaciones; los tipos de plástico más comunes son el polietileno (PE, en los envases de yogur), el polipropileno (PP, el material de las ubicuas bolsas de plástico) y el policloruro de vinilo (PVC, componente principal de los discos de vinilo o los revestimientos para suelos). Además, probablemente todas las botellas de refresco están

hechas de teleftalato de polietileno (PET) y los vasos de café para llevar de poliestireno (PS). El 42 % de todo el plástico producido en la historia se ha utilizado para embalajes, otra gran parte se usa en el sector de la construcción y la industria textil. También ha traído muchas cosas buenas y ha salvado vidas: en la medicina se ha vuelto casi imprescindible, con las jeringuillas desechables, las bolsas de sangre y los envases para mantener los vendajes estériles.

El lado oscuro es precisamente su magnífica durabilidad. El plástico no se descompone en la naturaleza; la fotooxidación, una reacción de oxígeno y luz UV (radiación solar), rompe las cadenas de polímeros, que se van desgastando y degradándose en trozos cada vez más pequeños, el llamado «microplástico». Cada vez más pequeño, más pequeño, hasta que ya no lo podemos medir, pero ¿ha desaparecido realmente? No lo sabemos, y solo ese proceso de descomposición tarda entre cientos y miles de años, demasiado tiempo. Lo mismo pasa con el plástico en el mar, al menos mientras flota en la superficie y está expuesto a la luz del sol. En realidad, no todo el plástico flota, depende de la densidad y de su forma: por ejemplo, el PET no flota, pero sí flota en forma de botella llena de aire. Además, con el tiempo se van acumulando microorganismos, como algas y bacterias, en torno al plástico y crecen, haciendo que se vuelva más pesado y, antes o después, también los trozos que flotan empiezan a hundirse. No es de extrañar que Victor Vescovo, que en abril de 2019 estableció un nuevo récord de inmersión de 10.928 metros en la fosa de las Marianas, recibiera el saludo de una bolsa de plástico. La comunidad científica no para de encontrar plástico en otras aguas profundas; gracias a los robots de inmersión y a las cámaras preparadas para esas profundidades, pueden examinar el estado del lecho marino que, por desgracia, está saturado de nuestra basura. Sorprendentemente, este hecho es independiente de que haya personas cerca, ya que incluso el lecho marino de lugares aislados, como el Ártico, está lleno de basura. Un estudio muestra que el número de trozos de basura por kilómetro cuadrado se dobló entre 2002 y 2011, pasando de 3.635 a 7.710, lo que hace que el Ártico tenga una concentración de basura similar a la del cañón submarino frente a la costa de Lisboa, en el que se ha medido una concentración de 6.600 trozos de basura por kilómetro cuadrado. No está claro qué ocurre con el plástico ahí abajo, pero, dado que la luz solar no penetra a esa profundidad y no se produce fotooxidación, probablemente ese plástico quede cubierto por los sedimentos en los próximos milenios. En un estudio a largo plazo que investigaba las consecuencias de la minería submarina en el ecosistema circundante, se pudo estudiar de casualidad también la degradación del plástico en aguas profundas, rescatando basura, una bolsa de plástico y un envase de queso fresco, de una profundidad de

más de 4.000 metros. A partir de la ubicación y el etiquetado, quedó claro que la bolsa de plástico era de una expedición de 1989 y que el envase de queso fresco tenía que haber caído de su propio barco de investigación en 1992 o 1996, porque ni siquiera los científicos se comportan de manera ejemplar. Sabían con precisión que el plástico llevaba allí más de veinte años, y no pudieron encontrar señales de degradación o de fragilidad, probablemente debido a la falta de radiación solar, el frío y el escaso movimiento del agua. Como dato interesante, el estudio de la bolsa de plástico y del envase de queso fresco también determinó que el plástico modificaba el hábitat de las bacterias de tal manera que la combinación de especies de las colonias de bacterias en el plástico era muy distinta de la del lecho marino circundante.

Antes de que el plástico llegue al fondo del océano, debe hundirse y atravesar toda la columna de agua. La permanencia de plástico en la columna de agua ha centrado la atención de la ciencia en los últimos años con resultados interesantes. Se encuentran microplásticos hasta 2.000 metros debajo del parche de basura del Pacífico, especialmente partículas inferiores a 1,5 milímetros, sin embargo, la concentración es menor que la de la superficie. Da la impresión de que el plástico flotante se fuera desgranando en el agua profunda a medida que se descompone, igual que la leche flocula cuando se le añade zumo de limón.

Antes de que el plástico flotante se hunda, una buena parte vuelve a tierra y, con suerte, alguien con conciencia lo recogerá, pero eso solo ocurre cuando el plástico llega a una zona habitada, de lo contrario, pueden acumularse auténticas montañas de basura. Cuando grupos de investigadores recorrieron y tamizaron las playas de la deshabitada Isla Henderson (sí, tamizaron la arena para buscar trozos pequeños de plástico), allí se acumulaban unos 37,7 millones de trozos de plástico con un peso de 17,6 toneladas. Cada día llegaban veintiséis trozos nuevos por metro. Esto es llamativo no solo porque la isla esté deshabitada, sino porque está lejos de cualquier atisbo de civilización, en medio del Pacífico entre Nueva Zelanda y Perú. Algunos restos de basura, como boyas o redes, pueden deberse a actividades pesqueras, pero, como se veían etiquetas en español, se asume que el giro del Pacífico Sur lleva la basura desde la costa de Sudamérica hasta la isla Henderson. Nuestra basura también se acumula en el hielo del Ártico y de la Antártida, como demuestra la alta concentración de microplásticos en testigos de sondeo en el hielo. Ni siquiera los terrenos vírgenes escapan a nuestra basura.

Existe otro lugar más bien inesperado en el que se pueden encontrar plásticos: los animales. Lamentablemente, algunos animales, tanto grandes como pequeños, comen plástico por motivos muy diversos.

Los animales filtradores, que filtran el agua en busca de microorganismos y partículas orgánicas, recogen muchos trozos pequeños de plástico, porque realmente no lo pueden evitar. Las tortugas, cuyo alimento favorito son las medusas, comen bolsas de plástico por error confundiéndolas con medusas, algo que también nos pasa a las personas. Es posible que los peces o pájaros coman plástico voluntariamente, bien porque el aspecto es similar al de sus presas o porque las algas que crecen en el plástico hacen que huela a comida. A primera vista, comer plástico un par de veces no es nada dramático, todos y todas lo hemos hecho en nuestra infancia, pero cuando se come solo plástico en lugar de comida de verdad, se acaba muriendo de hambre. También resultan muy problemáticos los bordes afilados de los plásticos que provocan heridas en el tracto gastrointestinal de los animales, o las piezas demasiado grandes que, como no se pueden digerir, permanecen en el estómago. No sabemos cuánto plástico comen los animales y cuántos animales mueren por ello; aunque muchos animales muertos en las costas tienen restos de plástico en el estómago, no se puede decir con seguridad si el plástico es la causa de la muerte. Sin embargo, los avisos de ballenas y delfines varados en las playas con el estómago lleno de plástico son cada vez más habituales. A principios de 2016, treinta cachalotes aparecieron varados en el mar del Norte, y en los estómagos de nueve de ellos se encontraron grandes cantidades de plásticos: redes de captura de cangrejos, un cubo e incluso una cubierta de motor. Uno de los animales se había tragado casi 25 kilos de plástico. Actualmente, se ha encontrado plástico en el 43 % de todas las especies de ballenas, en el 36% de las especies de aves marinas y en el 100 % de las especies de tortugas marinas. Dado que el fulmar boreal solo se alimenta en alta mar, el contenido de su estómago se está utilizando como indicador, y no tiene buena pinta: casi el 93 % de los fulmares boreales encontrados muertos en el mar del Norte entre 2015 y 2019 tenían plástico en el estómago, lo que refleja el grado de contaminación de este mar. Este otro tipo de consumo puede suponer que haya hasta 100.000 toneladas de plástico en animales.

Lo último que le puede pasar al plástico perdido es la degradación. Por lo general, una parte del plástico se degrada tanto que no podemos medirlo con los métodos disponibles actualmente. Como ya hemos mencionado, el plástico se degrada en microplástico, es decir, trozos inferiores a cinco milímetros. El denominado microplástico primario se fabrica ya con ese tamaño y se encuentra en exfoliantes y otros productos cosméticos, por ejemplo. El microplástico secundario se genera a partir de plásticos más grandes que se vuelven quebradizos a causa de la luz del sol, el calor o la fuerza de las olas y van degradándose en trozos más pequeños. También el uso, como el

desgaste de los neumáticos o las suelas de los zapatos, puede generar microplásticos, y también se incluyen las microfibras que se descomponen al lavar prendas de tejidos sintéticos. El reducido tamaño de los plásticos hace que sea difícil y costoso hacer mediciones; en los últimos años, los nuevos métodos, como la espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR), han hecho posible medir también microplásticos que no se pueden identificar a simple vista. Para ello, se filtra agua del mar y se analiza con un microscopio y un espectrómetro FTIR; la radiación infrarroja hace que las moléculas de las micropartículas oscilen y el espectrómetro las mide. La oscilación depende de la composición del material y se puede utilizar para identificarlo como si fuera una huella dactilar. Esto permite medir incluso partículas minúsculas y saber si son plásticos y de qué tipo. Desde que se usa ese método, las concentraciones medidas de microplásticos no dejan de aumentar, no necesariamente porque crezca la concentración en la naturaleza, sino porque antes no se medían con tanta precisión. Así, hace poco se demostró que, en los primeros 200 metros del Atlántico, se encuentran masas de microplásticos de entre 32 y 651 micrómetros. Según estimaciones, podría haber entre once y veintiún millones de toneladas de plástico de este tipo en el Atlántico, lo que permite suponer que el plástico perdido está repartido en esas fracciones mínimas a lo largo de toda la columna de agua y que, hasta ahora, simplemente no se tenía en cuenta porque no había métodos de medición. Según las nuevas estimaciones, hay repartidas al menos catorce millones de toneladas de microplásticos en todo el lecho marino.

Si el microplástico sigue degradándose y su tamaño queda por debajo de los cien nanómetros, se habla de nanoplásticos. Medir el nanoplástico en el entorno es aún más difícil y era casi imposible hasta ahora, por lo que solo se pueden realizar estimaciones sobre su concentración en el mar. Pero ¿por qué el plástico en el mar es un problema?



La basura más común recogida durante el International Coastal Cleanup en 2019: en primer lugar, envases alimentarios (de dulces, de patatas fritas y similares), 4.771.662. En segundo lugar, colillas, 4.211.962. En tercer lugar, botellas de plástico, 1.885.833. En cuarto lugar, tapones de plástico, 1.500.523. En quinto lugar, pajitas y palillos de remover, 942.992.

La basura en la playa queda mal y espanta a los turistas, con las consabidas consecuencias económicas. También es problemático para el tráfico de barcos, porque el plástico se enreda en las hélices, y eso puede resultar caro: se estima que ha causado hasta 1.260 millones de dólares en daños solo en aguas de Asia. Sin embargo, el plástico no solo es un problema estético o económico, sino que supone un peligro letal para los animales. Como ya hemos dicho, a menudo se confunde con comida, pero también puede resultar una trampa mortal. Solo en aguas de Estados Unidos se encontraron 1.800 animales con plástico en el estómago o atrapados en plástico entre 2009 y 2018. Se vieron afectadas más de 40 especies, sobre todo tortugas y mamíferos marinos. Los animales se enredan especialmente en objetos cotidianos como cintas de embalar, bolsas y globos. Las redes de pesca perdidas, conocidas como «redes fantasma», también resultan muy problemáticas: una vez que entran en las redes, son presa fácil para los depredadores, o bien se mueren de hambre si no son capaces de liberarse. Los animales marinos que respiran aire, como las tortugas, las ballenas o las focas, se ahogan cuando caen en una de esas redes. Y aun cuando el animal se pueda liberar, los restos de cuerda pueden enredarse en el cuerpo y provocar lesiones e inflamaciones graves. Se estima que cada año se pierden unas 640.000 toneladas de redes, lazos de pesca, trampas para peces, cangrejos y similares, sin embargo, no se sabe con seguridad a cuántos animales les ocasiona la muerte.

El hecho de que el plástico flote y solo se degrade lentamente conlleva otro problema: puede ayudar a ciertas especies de animales a conquistar nuevos hábitats, a menudo a costa de la biodiversidad

local. Algunos animales marinos, como los balánidos, los cnidarios, las algas, los cangrejos y los bivalvos, además de muchos microorganismos, se sienten como en casa sobre el plástico y pueden viajar miles de kilómetros. Hasta seis años después del terrible tsunami de Tohoku de 2011 siguieron llegando plásticos desde Japón a la costa oeste de Estados Unidos y, con ellos, nada menos que doscientas ochenta y nueve especies diferentes de animales marinos que son nativos de las costas de Japón. Solo con que una de estas especies se adapte al nuevo hábitat, puede desplazar a las especies nativas y provocar el caos en el equilibrio ecológico.

Actualmente, el microplástico centra toda la atención porque no hay ningún lugar del mundo donde no se haya encontrado. No importa dónde se mire en el mar, siempre habrá microplástico, así como en todas partes en tierra firme, del suelo a las cimas más altas, hasta en la atmósfera vuela el microplástico y lo impregna todo, incluida nuestra alimentación. Se ha encontrado en agua, en miel, en sal y también en cerveza, es decir, que ya no podemos librarnos de él. ¿Supone el microplástico un problema para nuestra salud cuando lo ingerimos con nuestra comida? Por desgracia, no lo sabemos, ya que hay muy pocos estudios dedicados a ello. En teoría, el nanoplástico tiene el potencial de introducirse en las células, pero no se sabe si ha llegado a pasar ni qué efectos puede tener. Llevamos más de sesenta años viviendo en la era del plástico y, hasta ahora, no se han detectado enfermedades que se puedan achacar al consumo de microplásticos, pero quién sabe lo que pasará si las concentraciones aumentan demasiado.

El microplástico del mar también se observa con inquietud. Los microorganismos lo consumen o se quedan atrapados en él, pero aún no está claro si eso tiene algún efecto. Los estudios en los que se investigó la reacción al consumo de plástico del plancton o de animales filtradores, como los bivalvos, mostraron efectos negativos en el metabolismo, la ingestión de alimento, el crecimiento, la descendencia, las inflamaciones y una mayor mortalidad. En bivalvos y peces se ha podido comprobar que las partículas minúsculas llegaban a los tejidos, el hígado y las agallas. Por ejemplo, las partículas de microplástico provocaron una mayor mortalidad en la mitad de una población de cladóceros de la especie *Daphnia magna* expuesta al mismo. Sin embargo, las concentraciones de microplásticos usadas en los experimentos eran mucho mayores que las que encontramos actualmente en la naturaleza: la concentración del experimento fue de $8,6 \times 10^7$ partículas por litro, un millón de veces superior a las entre dieciséis y cien partículas por litro de agua de mar que se considera actualmente la máxima concentración de microplástico en la naturaleza, medida en la costa surcoreana. Los

experimentos con bivalvos y peces demostraron que las partículas de nanoplástico también pueden penetrar en los tejidos y las células, pero las concentraciones de estos experimentos también estaban muy por encima de lo que se encuentra en la naturaleza actualmente. Además, las partículas tenían carga positiva, lo que facilitaba la penetración en las células, y es muy improbable que las nanopartículas de la naturaleza tengan carga positiva.

Cada día nos exponemos a microplásticos, ya que no solo se encuentran en nuestra comida, sino también en el aire, principalmente en forma de microfibras de nuestra ropa, de alfombras y muebles o partículas de la abrasión de los neumáticos. La investigación de los micro y nanoplásticos es muy complicada y aún no está nada claro si estas partículas tienen en realidad consecuencias negativas en los organismos marinos y en nuestro propio organismo. Para obtener una mayor comprensión necesitamos más investigación y desarrollar métodos mejores o nuevos. Estos estudios son más bien una mirada al futuro, en el que la marea de plástico no se detiene más que un instante. Hasta ahora, tampoco se había podido comprobar el temor de que el plástico se esté acumulando en lo más alto de la cadena trófica fuera infundado; en su lugar, se afirmaba que el microplástico ingerido se volvía a expulsar rápidamente y que, por tanto, la acumulación y la entrada en la cadena trófica eran un problema más bien pequeño. Mucho más peligrosa que el microplástico es la aparición de contaminantes orgánicos persistentes o COP (en inglés *Persistant Organic Pollutant*, o POP). Entre ellos se incluyen insecticidas como el DDT o clordano, o productos químicos como el PCB. Estos contaminantes se descomponen muy lentamente en la naturaleza y, como se adhieren fácilmente a las partículas de polvo, se distribuyen por todo el mundo con el viento. El problema es que se sospecha que algunas de estas sustancias son cancerígenas y pueden provocar trastornos hormonales o infertilidad.

Dado que los COP son hidrófobos, es decir, que repelen el agua, como el plástico, los contaminantes apartan el agua del plástico, por decirlo de alguna manera. Sin embargo, esto no sucede de la noche a la mañana, pasan meses o incluso años hasta que un trozo de plástico se satura de estos contaminantes. A esto se suman también aditivos químicos que se añaden al plástico durante la producción, por ejemplo, para hacerlos suaves y elásticos, o como protección frente al fuego. El plastificante bisfenol A, o BPA, es una sustancia que evita que el plástico se vuelva quebradizo y que se sospecha que altera las hormonas y provoca cáncer. Por ello, la UE prohibió su uso para biberones ya en 2011 y también se minimizó la cantidad de BPA que pueden contener los plásticos que van a estar en contacto con alimentos. Hace poco, Alemania ha incluido el BPA en la lista de

declaración de intenciones de limitación para reducir su uso y encontrar un sustituto que no sea dañino.

El temor último es que los animales que consumen plástico ingieran también estos COP y aditivos y los acumulen, aunque hasta ahora no se ha podido comprobar en experimentos. Al contrario, se ha llegado a demostrar que los animales en la base de la cadena trófica, como el plancton, absorben más plástico que COP.

A raíz de estos conocimientos surge una teoría opuesta: dado que los animales acuáticos están expuestos a esos contaminantes y se acumulan en sus tejidos, el plástico consumido podría expulsar dichos contaminantes del cuerpo. Esto sería muy práctico, pero está por ver si sucede en realidad.

En resumen, tenemos que reconocer que seguimos a oscuras en cuanto a los riesgos del microplástico. No obstante, sabemos que el plástico supone peligros o los supondrá en un futuro próximo. Entonces, ¿qué podemos hacer para evitar más daños? Habrá quien se tranquilice citando los informes que afirman que la mayoría de la contaminación por plástico sucede en Asia y no tiene nada que ver con Europa; a esa gente le recomiendo un nuevo estudio de Kara Lavender Law y sus colegas, en el que se demuestra que Estados Unidos es el mayor contaminante de plástico del mundo, con 105 kilos por persona, seguido de cerca por Gran Bretaña, Corea del Sur y Alemania en cuarto puesto, con 81 kilos por persona. Dado que una gran parte de la basura de plástico se exporta desde esos países, principalmente a países en desarrollo africanos o asiáticos, la basura estadounidense o alemana también llega al mar allí; contando con la basura de los países de origen que se desecha ilegalmente o se manipula incorrectamente, Estados Unidos es el tercer mayor contaminante del mundo en cuanto a basura en el mar, con 1,5 millones de toneladas.

Esto deja claro que somos corresponsables y que tenemos que revisar nuestro consumo de plástico, por eso también es importante prestar atención a que nuestros desechos no acaben en la naturaleza y depositarlos en los cubos de basura, aunque estén a un par de kilómetros. Por supuesto, la mejor basura es la que se evita, porque no se genera, de modo que intentar prescindir del plástico en el día a día es lo mejor que se puede hacer al respecto, aunque es un paso muy difícil de dar, porque el plástico se usa para absolutamente todo. Necesitamos repensarlo todo y transformar nuestra economía en una economía circular, en la que, idealmente, todo el plástico que se use se recicle y reutilice. Actualmente, el porcentaje mundial de reciclaje está en el 9%, con lo que hay mucho margen de mejora. Aquí debe intervenir la política, obligando a la industria a dar los pasos necesarios; esos pasos tienen que estar muy bien pensados, porque no todas las soluciones tienen sentido.

Por ejemplo, el bioplástico, tan aclamado a menudo, no es la solución que esperábamos: se fabrica con materias primas renovables, por eso se llama «bio», pero no siempre se degrada fácilmente en la naturaleza. Algunos tipos de bioplásticos solo se descomponen en instalaciones industriales de compostaje a altas temperaturas, de modo que, si llega al mar, es igual de nocivo que el plástico de toda la vida. El bioplástico especial PHA se descompone relativamente rápido en aguas cálidas, pero en aguas frías o en el fondo marino, donde la actividad bacteriana es mucho más lenta, es muy diferente.

Limpiar todo el tinglado que hemos montado es imposible, ya que ni siquiera con un equipamiento de la más alta tecnología podemos ni debemos filtrar todo el mar para retirar todo el microplástico ni cribar todo el fondo marino para recoger el plástico que se acumula allí: esas acciones destruirían más de lo que repararían. Sin embargo, sí podemos instalar barreras en los ríos para evitar que llegue aún más plástico al mar, y realizar campañas concretas de recogida de plástico en zonas con mucha basura para reducir un poco la contaminación. Por eso es importante que sepamos dónde se acumula el plástico para coordinar los trabajos de recogida. La comunidad científica sigue intentando averiguar dónde se encuentran esos millones de toneladas perdidas de plástico. Hay quien dice que la mayor parte del plástico está almacenada en el fondo marino, y otra gente cree que, en la mayoría de los casos, el plástico vuelve a la costa y se queda en las playas, o simplemente se degrada y se convierte en microplástico. Hay muchas cosas que aún no sabemos sobre la problemática de la contaminación de plástico en los mares, sin embargo, algunos estudios nos permiten sospechar que el empeoramiento de la situación podría tener consecuencias fatales, y eso es lo que tenemos que evitar. Recientemente se ha encontrado microplástico por primera vez en la placenta de bebés no nacidos: actualmente, nuestros niños y niñas ya tienen contacto con plástico antes de nacer. Si no queremos que crezcan en un planeta convertido en un vertedero, debemos actuar ya.

El restaurante de los tiburones blancos

Imagínate en una playa de arena blanca, con la cabeza ligeramente recostada, los brazos y las piernas estirados, los ojos cerrados, sintiendo los rayos del sol calentándote la piel. Todo está tranquilo, solo el rumor regular de las olas en la orilla interrumpe el silencio. Hace mucho calor, así que te levantas y te diriges hacia el agua turquesa, con el sol lanzando destellos sobre la superficie. La arena caliente te quema los pies, así que corres al agua y saltas sobre las pequeñas olas que rompen contra la orilla. Te adentras en el mar hasta que se va haciendo más profundo, así que te tiras de cabeza y te hundes en el fondo del océano. El sol te ha amodorrado, pero meter la cabeza en el agua fría te despeja; el aire crea burbujas en torno a tus orejas mientras desciendes y todo vuelve a estar en silencio mientras te deslizas por el agua. Tomas aire cuando vuelves a la superficie y sigues nadando mar adentro, en dirección al arrecife que se dibuja en la lejanía; el agua se vuelve más profunda, el turquesa claro se vuelve de un azul cada vez más oscuro. Te detienes, te vuelves y miras hacia la playa: la arena blanca brillante de la orilla queda muy lejos. De pronto, ves un movimiento con el rabillo del ojo y, cuando te giras, ¿es eso una sombra oscura grande? La superficie del mar picado no te permite ver nada. ¡Pero sí! Ahí está la sombra otra vez, y se acerca cada vez más…

¿Qué pasa después? ¿Habías pensado que aparecería un tiburón? En realidad, es bastante improbable, es mucho más probable que sea un montón de algas oscuro en el lecho marino que parece que se mueve por las olas. También puede que se trate de un trozo grande de basura, como un neumático o una bolsa de plástico, ahora hay de todo flotando en el mar. Con un poco de suerte, se tratará de una tortuga o una raya que pasa junto a ti. Sin embargo, ¿por qué tenemos miedo de que sea un tiburón cuando nos imaginamos un escenario así?

La respuesta tiene que ver con uno de los primeros taquillazos de Steven Spielberg. Desde el estreno de *Tiburón* en 1975, el mayor depredador marino del mundo está en la cabeza de todo el mundo: ¿quién no ha pasado miedo con el monstruo llenándose la tripa con los inocentes de la playa de la ficticia isla Amity? Sangre artificial a toneladas y barcos que explotan, ¿qué más se puede pedir? Por desgracia, no hay estudios científicos sobre si el número de personas que iban a la playa se redujo después del estreno de la película, pero sí hay una cosa clara: después de ver la película, todo el mundo tuvo un poco de miedo de volver a nadar en el mar, y yo no soy una

excepción, aunque me encanten los tiburones y crea que son unas criaturas maravillosas y fascinantes. Cuando nado en mar abierto y no puedo ver lo que hay debajo de mí (algo que sucede a veces al bucear cuando vuelvo al bote la primera o la última), me siento algo inquieta. Si también os pasa, os informo de que no estamos solos: hay estudios que han descubierto que una cuarta parte de los miedos que se desarrollan en la niñez al ver películas de terror se mantienen en la edad adulta. Las películas que más huella han dejado son *Poltergeist, The Blair Witch Project, Scream* y, en primer lugar, *Tiburón.* Muchos de los participantes en los estudios seguían experimentando una sensación de intranquilidad al bañarse en el mar, y algunos incluso evitaban hacerlo. En otras personas, el miedo era tal que no se atrevían a meterse en lagos o piscinas en las que, por supuesto, no hay tiburones. En resumen, si queréis que vuestros hijos e hijas vayan de vacaciones a la playa o de acampada, no les dejéis ver las películas que he mencionado anteriormente bajo ninguna circunstancia. Peter Benchley, el autor de la novela en la que se basa *Tiburón*, se arrepintió mucho de haber destruido la imagen de los tiburones de esa manera, por lo que se involucró activamente en la protección de estos y de los océanos hasta su muerte.

No obstante, Steven Spielberg no es el único culpable, los medios de comunicación también contribuyen a alimentar el miedo a los tiburones: se suele informar sobre los ataques de tiburones de manera sensacionalista, aun en los documentales de naturaleza se añade música de fondo amenazante cuando aparecen tiburones. Todo esto ha contribuido a que los tiburones se vean como bestias sedientas de sangre. Pero ¿está justificado este miedo?

El International Shark Attack File (ISAF) recoge y documenta informes sobre ataques de tiburones en todo el mundo, incluso noticias muy antiguas: la documentación más antigua sobre un ataque de tiburón es del siglo XVI. Según el ISAF, cada año se producen entre setenta y cien ataques no provocados de tiburones, de los cuales entre cinco y quince resultan mortales. No provocados quiere decir que el ataque se produjo por sorpresa y sin ningún contacto previo con el tiburón. Un surfista mordido de repente en la pierna por un tiburón cuenta como ataque no provocado. Por el contrario, en Internet se puede ver un ejemplo de un ataque provocado: un buceador acaricia a un tiburón y le da un beso en el hocico, a lo que el tiburón responde mordiéndole el labio. No sé si se trata de un fetiche, pero no aconsejo imitar el vídeo. Entre los tiburones que protagonizan más ataques destacan el tiburón blanco, luego el tiburón tigre y el tiburón toro, algo que no es de extrañar, ya que estas especies son las más grandes y el tamaño de las personas entra en sus esquemas de presas. La mayoría de ataques de tiburones ocurren en Florida, con 236 ataques;

Australia, con 140 ataques, y Hawái con 72, de los 794 casos documentados entre los años 2010 y 2019. Además, el número de ataques de tiburones ha aumentado en las últimas décadas, pero esto no se debe a que los tiburones se hayan vuelto más agresivos o a que la carne humana sea el nuevo superalimento de los tiburones modernos, sino al aumento de la población humana y, con él, al aumento de la gente que va a la playa: las actividades deportivas acuáticas cada vez son más populares, y los surfistas y *bodyboarders* son las personas que más a menudo están implicadas en ataques. La aparición del surf en los años setenta supuso un aumento de los ataques de tiburones. Aun así, la mortalidad ha descendido, gracias a una atención médica mejor y más rápida y a la formación específica en socorrismo. Desde el punto de vista estadístico, la cuota de entre cinco y quince víctimas de ataques de tiburones al año es prácticamente nada. La probabilidad de morir por el ataque de un tiburón es de una entre 13.748.067. Y si estás pensando «buf, surfear, yo prefiero el monopatín»: entre 1999 y 2010, en Estados Unidos hubo de media 74 muertes por esquís, patines y monopatines. Quedarse en la cama por puro miedo tampoco es una buena solución, ya que entre 2004 y 2010 murieron de media 668 personas al caerse de la cama. ¿Qué hemos aprendido con esto? ¡Que no estamos a salvo en ningún sitio!

Los tiburones son lo último que debería asustarnos. Antes al contrario: los tiburones son animales fascinantes pero de los que seguimos sabiendo muy poco, porque seguirlos es una tarea difícil. Observar por dónde se mueven y en qué aguas permanecen tiene su dificultad, ya que se mueven muy rápido y, también, porque el agua impide verlos.

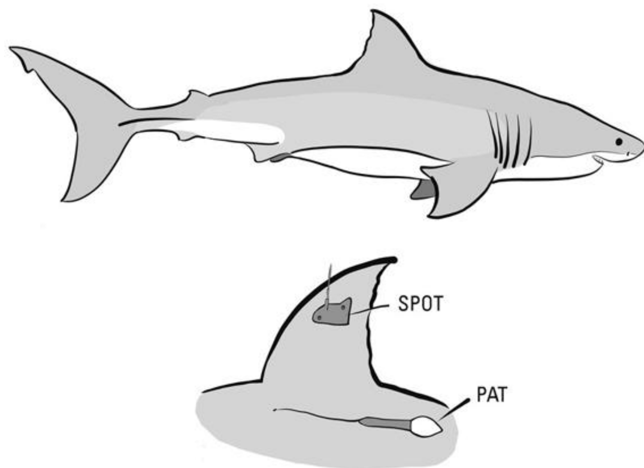
Antes se creía que los tiburones blancos frecuentaban las costas porque se alimentan de focas (entre otros animales), lo que explicaría que se encuentren más de estos tiburones donde hay muchas focas. Los lugares más conocidos para ver este depredador tan popular como temido se encuentran cerca de las colonias de focas en las costas de Australia, Sudáfrica, California y Baja California. Ya entonces se sabía que los tiburones no se quedaban todo el año junto a estas colonias, el misterio era saber dónde pasaban el resto del tiempo. Como suele ocurrir, las nuevas tecnologías permitieron arrojar luz sobre este hecho, y el desarrollo de emisores radiogoniométricos supuso un gran avance a principios de los años 2000, ya que acompañaron a estos animales en sus largos viajes por los océanos. Estos emisores no solo pueden medir la posición geográfica de un animal, sino también distintos parámetros ambientales, como la presión, lo que permite determinar la profundidad del agua a la que se encuentra el animal. Además, registran la temperatura del agua y la velocidad a la que

avanza el sujeto. Todos estos valores se miden varias veces por minuto, en función del sistema y de la programación.

Hay dos tipos de emisores distintos que se utilizan a menudo en la investigación de tiburones. Principalmente se usan los PAT, porque se pueden colocar en los sujetos sin necesidad de cazarlos. PAT significa Pop-up Archival Tags, algo así como «etiquetas de recogida de datos emergentes». Los PAT se clavan en la robusta piel de los tiburones con un arpón especial bajo la aleta dorsal y se anclan en la musculatura con un gancho. Suena más dramático de lo que parece, es un proceso muy rápido y supone relativamente poco estrés para el tiburón. En cuanto el PAT está anclado, empieza con las mediciones de la posición geográfica en intervalos de tiempo programados previamente, por ejemplo, dos minutos. Dado que el tiburón, y con él el PAT, suele encontrarse la mayor parte del tiempo bajo el agua y el PAT no se puede conectar a un satélite, estas mediciones no se realizan mediante GPS, sino que se miden las condiciones de luz en torno al tiburón. Estos datos permiten determinar la posición del sol y, con ella, la ubicación geográfica. Por supuesto, este sistema tiene sus limitaciones, ya que, cuando el tiburón se sumerge tanto que apenas hay luz o el agua está muy turbia, es difícil determinar su posición, lo que puede dar lugar a mediciones imprecisas. Las mediciones geográficas, así como los parámetros ambientales registrados, se almacenan en el PAT, que se mantiene anclado hasta una fecha programada en la que se suelta por sí mismo y emerge a la superficie. La observación suele durar varios meses, pero puede alcanzar hasta un año. Una vez en la superficie, el equipo manda los datos almacenados y su posición a los científicos, que suelen estar cerca porque normalmente navegan hacia el lugar donde esperan que aparezca el PAT en la fecha programada. Durante horas, inspeccionan el mar buscando ese tesoro de datos entre las olas. Es como buscar una aguja en un pajar, aun cuando el emisor está marcado con colores llamativos, así que encontrarlo produce una gran alegría. La realidad es que por satélite solo se envía un resumen de los datos recogidos, así que, para recibir los datos en alta resolución con todas las mediciones, es imprescindible encontrar el emisor.

La otra variante son unos transmisores conectados a satélites, como los emisores SPOT. SPOT significa Smart Position Only/Temperature Transmitting Tags, es decir, un emisor inteligente que envía la posición y la temperatura. Lo «inteligente» del SPOT es que aprovecha la marca distintiva de los tiburones: se coloca en la aleta dorsal, que, como se sabe por las películas, sobresale del agua cuando los tiburones nadan en la superficie, y esto permite al SPOT conectarse al satélite, es decir, transmitir su posición geográfica cada vez que sale a la superficie. Es como si el tiburón dijera «hola» al salir a la superficie,

lo que permite seguir su perfil de movimientos en tiempo real hasta que el emisor deja de funcionar. El elemento de fijación está diseñado de tal manera que se va degradando por la corrosión y cae en un plazo de unos dos años. Lo que hace que el SPOT sea más «inteligente» que el PAT es que transmite datos en tiempo real y los datos de posición determinados vía satélite son más precisos que las mediciones del PAT, que dependen de la luz. No obstante, el problema del SPOT es que para colocarlos hay que capturar a los tiburones, y sacarlos del agua y taladrarles agujeros en la aleta dorsal. Esto es costoso, porque se necesita un barco grande y el equipamiento adecuado, y también resulta estresante para los tiburones y las personas. Capturar a un tiburón tan grande y fuerte, elevarlo, fijarlo, tomar muestras, marcarlo y estresarlo y lesionarlo lo menos posible durante proceso no es una tarea nada sencilla. Otro problema del SPOT es que la aleta dorsal sobresale brevemente del agua y a veces el SPOT no puede encontrar un satélite con la velocidad suficiente para determinar su posición. Por ese motivo, lo más óptimo es usar ambos tipos de emisores.



Los tiburones blancos, llamados así por su llamativo abdomen blanco, pueden llegar a medir ocho metros. Los emisores SPOT y PAT se colocan en la aleta dorsal del tiburón.

Alguien puede estar pensando: eso es lo óptimo, ¿por qué no llevan todos los tiburones un emisor? De ese modo se podría crear un sistema de alerta estupendo para surfistas y bañistas: si se sabe con precisión dónde están los tiburones, podemos evitar que las personas se crucen con ellos. El problema es que tanto los emisores como las expediciones son caros; solo los emisores cuestan varios miles de euros, y no se puede confiar en que se mantengan anclados al tiburón. Muchos de los emisores se pierden porque se sueltan antes del momento planificado, bien porque se han colocado incorrectamente, o también porque

algunos animales intentan quitárselos, por ejemplo, frotándose contra el suelo. También se ha observado que los tiburones y otros peces depredadores muerden los emisores de sus congéneres y los destruyen. Este comportamiento es comprensible, ya que los emisores son molestos porque interrumpen su óptimo diseño hidrodinámico perfectamente adaptado y puede ralentizarlos al nadar. Por si fuera poco, el aspecto también puede ser un problema: los emisores de colores llamativos son de ayuda a la hora de encontrarlos en el agua, pero también pueden ayudar a las focas a detectar un tiburón acercándose en secreto a través del agua turbia, algo que es bueno para las focas, pero no tanto para el tiburón.

También se critica mucho los emisores porque suponen realizar perforaciones en la piel o la aleta de los animales, lo que puede causarles heridas e infecciones. Es peor aún cuando los emisores no se sueltan tras el tiempo programado, lo que puede provocar cicatrices y daños permanentes en la aleta dorsal. Esta aleta es importante, porque le da estabilidad al tiburón al nadar rápido, igual que las quillas de una tabla de surf. Por todo ello, es imprescindible considerar con cuidado cuándo y cómo usar uno de estos emisores para causar el mínimo daño y, al mismo tiempo, obtener la máxima cantidad de datos posible para la investigación y la protección de los tiburones.

En Australia el proyecto SharkSmart está probando un sistema de alerta, usando emisores acústicos que se implantan bajo la piel del abdomen del animal, sin molestar ni estorbar, y que duran toda la vida. Cada emisor lanza una señal acústica única cuando está cerca de una estación de recepción colocada en el mar, también llamada estación de escucha. Esta estación de recepción envía la información en tiempo real a la aplicación SharkSmart o a Twitter, para informar a la gente que está en la playa de la visita no deseada de un tiburón. No obstante, este sistema también es muy caro y marcar a tantos animales es una tarea titánica, aunque, si ayuda a evitar encuentros entre tiburones y personas, combatir miedos y obtener datos importantes para la investigación, es una inversión justificada.

Todos estos tipos de emisores han permitido obtener una nueva visión de la vida de estos depredadores. Se ha demostrado que no permanecen tanto en la costa como se creía anteriormente, y que nadan también en mar abierto y pueden llegar a cruzar océanos. Un tiburón hembra, Nicole, nadó en 2004 desde Sudáfrica hasta Australia y luego de vuelta, unos 20.000 kilómetros, en solo nueve meses. A principios de los 2000, cuando se seguía a las poblaciones de tiburones blancos del Pacífico Norte con ayuda de emisores PAT, se observó un comportamiento totalmente inesperado. Los tiburones que habían marcado frente a las costas del centro de California nadaban de repente hacia el Pacífico, en dirección al archipiélago de Hawái,

recorriendo casi 4.000 kilómetros. Una vez allí, también cambiaban sus patrones de buceo: en la costa, se mantenían entre la superficie y treinta metros de profundidad, mientras que, en el océano abierto, nadaban en la superficie o bien entre 300 y 500 metros de profundidad. Pasaban varios meses en aguas abiertas y luego volvían a la costa. Este comportamiento no era ninguna excepción, a lo largo de los años se demostró que ese viaje se repetía cada año. Los tiburones blancos no se quedan siempre en la costa, al contrario, pasan casi la mitad del año, en primavera y verano, en medio del océano. El lugar se bautizó como SOFA, abreviatura de Shared Offshore Foraging Area, es decir, zona compartida de búsqueda de comida en mar abierto. Es un nombre que no tiene mucho gancho y suena un poco tonto, quizás por eso se ha impuesto el nombre White Shark Café, el restaurante de los tiburones blancos.



El White Shark Café se extiende a lo largo de cientos de kilómetros entre la península de Baja California
y el archipiélago de Hawái.

Como el nombre indica, se supone que los tiburones van allí en busca de comida. Se tomaron imágenes de satélite para determinar la productividad de esta zona oceánica: los satélites pueden medir el color verde y, con él, el contenido de clorofila en la superficie. Dado que el fitoplancton es el principal organismo que contiene clorofila en el mar, se puede determinar cuánto fitoplancton hay en el agua. A su vez, el fitoplancton supone la base de la cadena trófica, así que se puede estimar cuánta vida marina hay en esa zona. Sin embargo, las tomas por satélite revelaron una imagen muy distinta de lo que

entendemos por una cafetería: desde el punto de vista de la nutrición, el White Shark Café es un desierto. Esa zona tiene el menor contenido de clorofila de todo el Pacífico, así que se asumía que no habría apenas habitantes marinos, por lo que la oferta para los tiburones se reduciría a cero. Entonces, ¿por qué nadan todo ese camino? ¿Qué hacen allí? ¿Hacen algo?

Para responder estas preguntas, la científica Barbara Block y su equipo viajaron al corazón del White Shark Café en 2018, con el objetivo de llegar al fondo del asunto. El año anterior habían marcado a treinta y ocho tiburones blancos con emisores y querían observarlos. Equipados con la mejor tecnología, robots y drones submarinos, examinaron hasta lo más profundo de ese inhóspito lugar. La sorpresa fue mayúscula: ¡el supuesto desierto resultó ser un oasis lleno de vida!

¿Cómo puede ser, si las imágenes por satélite apenas mostraban clorofila? Los satélites trabajan de forma óptica, así que solo pueden medir el contenido de clorofila en la superficie, no pueden ver más allá. En función de la claridad del agua, la luz del sol puede llegar hasta doscientos metros de profundidad, lo que significa que también hay fitoplancton en capas más profundas del agua, como en este caso. Los científicos encontraron un mayor contenido en clorofila, y con ella de fitoplancton, a cien metros de profundidad, con una gran cantidad de peces y animales invertebrados que se alimentan del plancton. El restaurante ofrece una enorme barra libre tanto para los tiburones blancos como para otros depredadores.

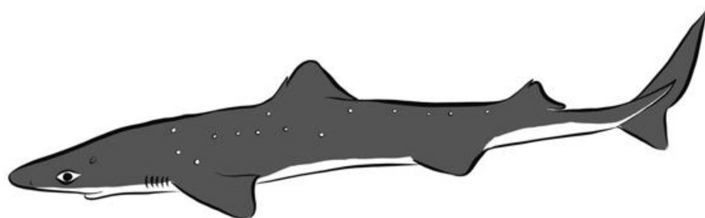
Esto explica también por qué los tiburones se sumergen más durante el día: en la costa, no suelen bajar más de treinta metros, mientras que en el restaurante se mantienen sobre todo a cien metros bajo la superficie, llegando a veces hasta una profundidad de quinientos metros. Probablemente cazan animales más grandes que emergen del mar profundo para comer algo del bufet. Sin embargo, las investigaciones suponen que la alimentación podría no ser el único motivo por el que los tiburones se juntan allí cada año; llama la atención que las hembras exhiban un comportamiento de inmersión distinto al de los machos durante el día. En primavera, los machos empiezan a agruparse en el centro del restaurante, y su comportamiento de inmersión cambia: nadan varias veces al día entre treinta y doscientos metros, mientras que las hembras se quedan en los límites de la zona, con visitas rápidas y ocasionales al centro. Su comportamiento de inmersión también se acelera, aunque de manera menos intensa que el de los machos. Como muy tarde en agosto, el último macho se pone en camino de vuelta a la costa, las hembras permanecen un tiempo más en el restaurante. Este comportamiento también se puede explicar con la búsqueda de alimento, podría ser que en esa época haya una determinada presa en el centro del

restaurante, como calamares que desovan, ya vistos en esa zona. No obstante, eso no explica por qué los tiburones se comportan de manera distinta en función del sexo, lo que ha llevado a formular una segunda hipótesis: se trata de un comportamiento de apareamiento.

Los machos se agrupan en el centro del restaurante formando lo que se conoce como lek, una especie de ruedo en el que varios ejemplares compiten por una hembra, y las hembras van al lek según les apetezca para buscar el mejor macho. Nadar rápidamente de arriba abajo podría significar que están olfateando feromonas, ya que estas se distribuyen mejor en horizontal que en vertical en las distintas capas de agua. Es posible que ese comportamiento sea una especie de danza o lucha, pero esto aún son hipótesis sin comprobar. Si fuera realmente un comportamiento reproductivo, no solo se trataría de un hito científico, porque se sabe muy poco de la estrategia sexual de los tiburones blancos, también sería la primera vez que se observa la formación de un lek en tiburones.

Aunque para la ciencia el White Shark Café fuera todo un descubrimiento, otras personas ya tenían claro que aquella zona no era ningún desierto. La expedición se encontró varias flotas pesqueras con palangres, que probablemente buscaban atunes, aunque con los palangres también se pesca mucho tiburón, por desgracia.

Los últimos cincuenta años han tenido un impacto dramático en la población mundial de tiburones, sobre todo por el incremento de la pesca industrial. Los tiburones suelen quedar atrapados en redes como captura accesoria, pero, además, se pescan de forma consciente, no solo por las aletas, sino también por la carne, que goza de mucha popularidad asimismo en Europa. A menudo, la gente no sabe que está comiendo tiburón porque se ofrece con otros nombres, como *schillerlocken*, que en alemán hace referencia a la ventrecha ahumada de la mielga, un tiburón que ahora está en la lista roja de especies amenazadas de la International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN). Otros nombres bajo los que se comercializa tiburón son pescado azul, galludo, pinchorro o ferrón. El surimi, sucedáneo de carne de cangrejo, también puede contener carne de tiburón, así que mucho cuidado al comprar pescado, no solo para proteger a los peces, sino por la salud, ya que la carne de tiburón suele contener grandes concentraciones de metales pesados, como el mercurio.



La mielga tiene unas espinas antes de ambas aletas dorsales; puede alcanzar los 160 centímetros y es un pez muy apreciado en cocina, por lo que sufre especialmente la sobrepesca y está incluido en la lista roja de especies amenazadas.

El aceite de hígado de tiburón, llamado «escualano», o el escualano que se obtiene a partir de él se usa en cosmética, por ejemplo, en cremas o pintalabios. Aunque el escualano se puede obtener de plantas, la mayor parte de la demanda se cubre actualmente con hígado de tiburón, al menos en Asia, ya que es más barato. Los fabricantes europeos de cosméticos se han sometido a la presión de los consumidores y han optado por alternativas vegetales en los últimos años. Si en tu crema pone «fitoescualeno», todo en orden. El escualeno también tiene usos médicos, por ejemplo, como adyuvante en vacunas, y se ofrece como complemento alimenticio bajo el nombre de aceite de hígado de tiburón. El cartílago de los tiburones se suele moler y vender en forma de pastillas con fines médicos, como tratar el reuma. La pesca deportiva también contribuye a que las poblaciones de tiburones estén disminuyendo, sobre todo si estos no se devuelven al agua.

A menudo se afirma que cada año se matan hasta cien millones de tiburones, pero la comunidad científica discute esta cifra. Tampoco la afirmación de que las poblaciones de tiburones han descendido un 90% en todo el mundo se sostiene desde el punto de vista científico, porque cada especie en cada lugar tiene una situación diferente. En cualquier caso, en lo que sí hay consenso es en que, en los últimos cincuenta años, las poblaciones de muchas especies se han reducido drásticamente, incluso de forma peligrosa. Se estima que alrededor de un tercio de las especies de tiburones y rayas están en peligro actualmente, y eso solo hace referencia a los datos de los que disponemos, porque de casi el 50% de todas las especies de tiburones y rayas sabemos demasiado poco para estimar hasta qué punto están amenazadas. También el tiburón blanco está en esa lista: desde el año 2000, está clasificado como especie en peligro y cuenta con protección internacional; pescar en un lugar con mucha población de tiburones blancos es contraproducente, por eso se está intentando que la UNESCO declare el White Shark Café Patrimonio de la Humanidad, de modo que se prohíba la pesca allí para proteger mejor a los animales.

Nuestros conocimientos sobre los tiburones aún tienen muchas carencias, por lo que nos sigue sorprendiendo encontrar lugares con los que no contábamos, como el White Shark Café. Otro de esos lugares es el Sharkano, que se llama realmente así. No se debe confundir con la película *Sharknado*, en la que unos tiburones vuelan dentro de un tornado comiéndose todo lo que se les pone por delante. Sharkano es una combinación de *shark* y *volcano*, es decir, *tiburón* y

volcán. Siento si hago añicos los sueños de alguien, pero no se trata de un volcán que escupe tiburones: el sharkano es un volcán abisal en el que nadan los tiburones. De primeras puede no sonar especial, pero, aunque sea submarino, se trata un volcán, y cuando entra en erupción no escupe fuego, pero sí magma y agua muy muy caliente, que puede llegar a más de 400 °C. El agua saturada de distintas sales, metales y gases se tiñe de blanco o de negro, según la composición; esa coloración hace que parezca humo cuando sube. Al igual que la nube de humo de un volcán terrestre, esta mezcla de agua y minerales se convierte en una nube hidrotermal en capas de agua más altas.

Uno de los volcanes abisales más grandes y activos es el Kavachi, en el archipiélago de Nueva Georgia, en las islas Salomón. Se extiende desde más de mil metros de profundidad hasta veinticuatro metros bajo la superficie, y sus frecuentes explosiones son tan potentes que también se oyen y se ven sobre el agua. En 2015, un grupo de investigación se atrevió a adentrarse en este peligroso volcán durante una de sus fases de inactividad para estudiar el poco conocido ecosistema de los volcanes abisales. Cuando las cámaras equipadas con cebo llegaron hasta cincuenta metros de profundidad en el cráter, se sorprendieron mucho de todos los habitantes que querían picar. Además del zooplancton, se podían ver muchas especies de peces, como la caballa de aleta azul o el pargo, a través la nube hidrotermal; la entrada más teatral fue sin duda la de los tiburones martillo y los tiburones sedosos, disparados desde las profundidades del cráter. Incluso se dignó a aparecer ante la cámara un habitante muy poco habitual, un tiburón dormilón del Pacífico, nadando lentamente frente a la cámara. El equipo estaba tan impresionado y sorprendido que le dieron un nuevo apodo al volcán, y así fue como surgió Sharkano. En realidad, es asombroso cuando se contemplan con más detalle las circunstancias de aquel lugar tan extremo: la temperatura media del agua es de 42 °C, una temperatura que el agua del mar no alcanza nunca en condiciones normales; y el pH es de 6,1, muy ácido, y además contiene azufre. Es una zona bastante incómoda y, sin embargo, los tiburones y peces habitan allí abajo en esas condiciones tan extremas. Por si fuera poco, a eso se añade el peligro constante de erupción: en los pocos volcanes abisales investigados hasta el momento, el interior del cráter es una «zona de muerte», llena de cadáveres de peces.

Ahora se asume que es porque el cráter del Kavachi es muy ancho en comparación con otros volcanes, y está tan cerca de la superficie que las corrientes y los vientos hacen que el agua se airee mejor, reduciendo la toxicidad. Después de una erupción volcánica en las Marianas, se encontraron las mismas especies de peces que en el cráter del Kavachi, lo que quiere decir que estas especies deben de estar

adaptadas de alguna manera para poder aguantar el «clima volcánico». No obstante, queda la duda de cómo actuarían en caso de erupción: ¿morirían sin más, deseando una muerte rápida e indolora, o serían capaces de sentir la erupción antes y escapar? Precisamente, los tiburones tienen ampollas de Lorenzini, unos órganos sensoriales muy sensibles que les permiten detectar campos eléctricos, diferencias en la temperatura del agua y, probablemente, también el campo magnético de la Tierra. Aunque están pensados principalmente para cazar, en el cráter del Kavachi podrían servir también de sistema de alerta. La forma de cabeza tan especial de los tiburones martillo les ofrece mucho espacio para los poros de las ampollas de Lorenzini, lo que podría suponer una ventaja. Como suele ocurrir en la ciencia, esta expedición acabó con más preguntas que respuestas, ofreciendo una panorámica del hábitat apenas investigado de los volcanes abisales y las nubes hidrotermales y reforzando la impresión de que estos podrían desempeñar un papel más relevante del que se pensaba en el ecosistema marino.

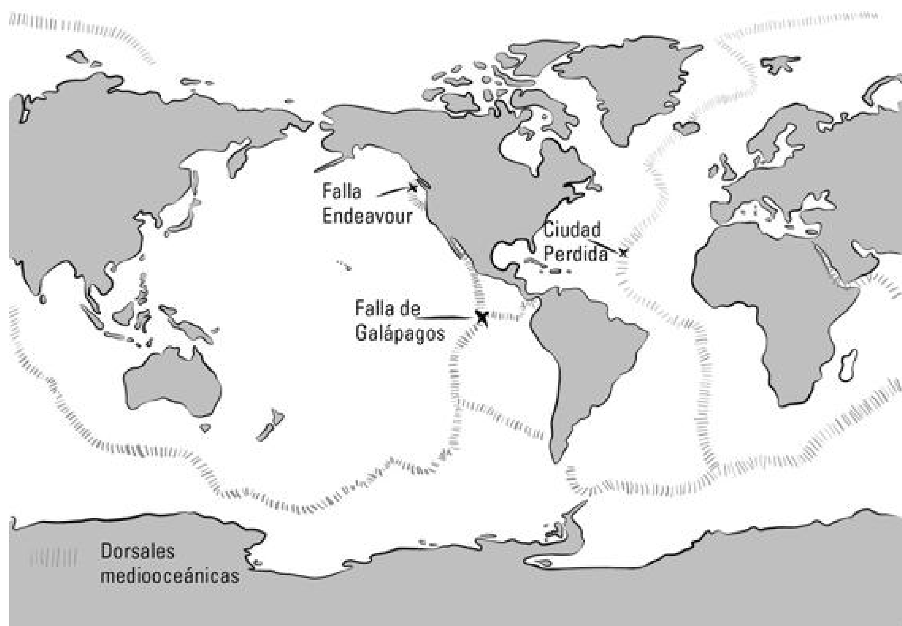
Los tiburones siguen planteando muchas incógnitas y sorprendiéndonos en lugares inesperados, pero esperemos que no en nuestras bañeras. Está claro que están en lo más alto de la cadena trófica, cumpliendo un papel importante en el mantenimiento del equilibrio del ecosistema en el que viven. Seguir reduciendo las poblaciones podría tener efectos imprevistos en esos ecosistemas. Su crecimiento tan lento (en función de la especie, la madurez sexual puede tardar entre dos y veinte años), los tiempos de gestación largos, de entre nueve y doce meses, y la baja cantidad de crías, de entre dos y veinte por camada o puesta de huevos, los hacen especialmente vulnerables a la sobrepesca. Por eso es tan importante el trabajo de investigación, ya que explora formas y lugares para permitirnos conocer y proteger mejor a estos animales.

Nubes abisales

Los años sesenta fueron una década importante para la humanidad: en 1969, casi todo el mundo siguió los primeros pasos de Neil Armstrong sobre la Luna en televisores en blanco y negro. Incluso quienes no vivían entonces conocen la conmovedora frase: «Un pequeño paso para el hombre, un gran salto para la humanidad». Nueve años antes, se había establecido otro récord que a la mayoría de la gente le resultará más desconocido que la llegada a la Luna: el 23 de enero de 1960, Jacques Piccard (cuyo abuelo, el inventor Jean Piccard, fue inspiración para el nombre del capitán de *Star Trek* Jean-Luc Picard) y Don Walsh fueron las primeras personas en llegar al punto más profundo del océano, en la fosa de las Marianas, a 10.984 metros de profundidad. A esa profundidad, la presión es de 1,1 toneladas por centímetro cuadrado, insoportable para las personas; incluso para los submarinos es un reto esa enorme presión. En aquel entonces, la opinión generalizada era que los peces no podían vivir a tal profundidad y con esa presión tan alta, por lo que, al principio, no se dio mucha credibilidad a las afirmaciones de Piccard y Wash de que habían visto un pez plano y gambas. La investigación de las profundidades, que aumentó de forma espectacular después de esa primera inmersión, arrojó luz al reino de la oscuridad y demostró que el lecho marino no tiene nada que ver con un triste desierto: cordilleras, valles y barrancos estimularon la investigación, y las fuentes hidrotermales se convirtieron en uno de los objetos de estudio más importantes. Las fuentes hidrotermales se encuentran cerca de las dorsales mediooceánicas, que son lugares volcánicos activos en el lecho marino de los que sale magma, que forma nuevo suelo. Esta actividad crea grietas y fracturas en la corteza terrestre del océano por las que entra agua marina, que se encuentra con el magma al rojo vivo y se calienta hasta los 400 °C, y reacciona también con las rocas calientes, enriqueciéndose con distintos minerales como compuestos de azufre o metales como hierro, manganeso, cobre, zinc o cobalto. El agua también puede incorporar gases como dióxido de carbono, metano, hidrógeno o ácido sulfhídrico, antes de volver a la superficie del lecho marino de forma explosiva a través de las grietas. Las sustancias disueltas pueden dar al agua un color negro o blanco, según la composición y la temperatura; la composición química del agua depende del lugar donde se encuentra la fuente. Cuando el agua caliente se mezcla con el agua fría del lecho marino, a unos 2 °C, algunos de los minerales disueltos se desligan, es decir, se vuelven sólidos y se depositan y acumulan en el lecho marino, formando

chimeneas con el tiempo en torno al lugar de salida. Dado que el agua caliente se asemeja al humo cuando sale, las fuentes hidrotermales y sus chimeneas también se conocen como fumarolas negras o blancas. Las chimeneas más altas descubiertas hasta ahora se encontraron en el campo de fuentes hidrotermales Ciudad Perdida y llegan a una altura de hasta 60 metros. Cuando se encuentran las fuentes y las chimeneas es posible bautizarlas y, los días que el equipo come payaso para desayunar a bordo, las chimeneas reciben nombres de héroes infantiles como *Sasquatch*, *Godzilla*, *Scooby*, *Piolín*, *Correcaminos* o *Homer Simpson*.

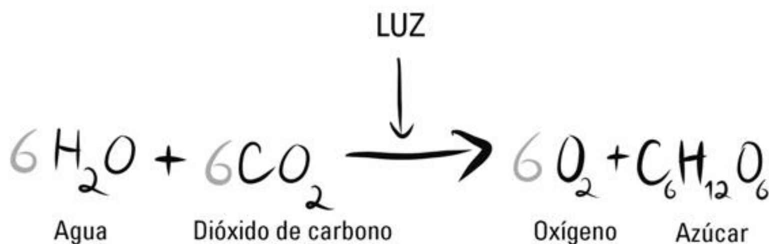
En 1977, cuando un grupo a bordo del *Alvin* quiso investigar la fuentes termales a miles de metros de profundidad en la dorsal mediooceánica cerca de las islas Galápagos, apenas pudo creer lo que vieron cuando llegaron a la fuente. ¡El lecho marino que se consideraba hostil a la vida estaba lleno a rebosar! Gusanos enormes, campos de bivalvos, bancos de gambas blancas, incluso algunos peces curiosos revoloteaban en torno a las fuentes calientes. Este descubrimiento fue casi como ver marcianos verdes: en aquel entonces, la biología consideraba que la vida no era posible a tal profundidad; por un lado, por la enorme presión, que debería haber aplastado a los animales como una apisonadora aplasta a un personaje de dibujos animados y, por otro, porque no entendían cómo era posible la vida sin luz solar.



Las dorsales mediooceánicas se extienden por todos
los mares y están llenas de fuentes hidrotermales. En la falla de Galápagos se

vieron por primera vez fuentes hidrotermales en aguas profundas.

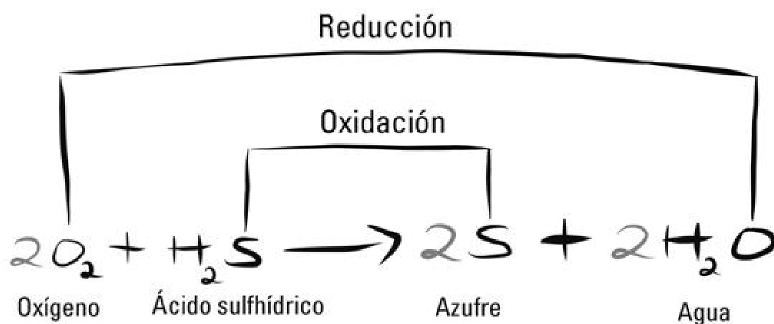
Todos los seres vivos terrestres necesitamos energía para sobrevivir, energía que nos proporciona el sol. Por supuesto, las personas y los animales no podemos usar esa energía directamente, excepto quizás para calentarnos un poco. Necesitamos que la energía se transforme en sustancias orgánicas que podamos metabolizar, en pocas palabras, en comida. La transformación de energía solar en alimento la hacen los organismos fotosintéticos, como las plantas. *Fotosíntesis* procede del griego clásico y significa «composición a partir de la luz». En la fotosíntesis se utiliza la energía de la luz para crear azúcar y oxígeno a partir de los compuestos inorgánicos dióxido de carbono y agua.



Así, la energía de la luz se transforma en energía química que los seres vivos terrestres podemos aprovechar. Como no podemos transformar la energía de la luz directamente en energía química, tenemos que comer los organismos que sí pueden hacerlo, o bien comernos a quienes se comen los organismos que sí pueden hacerlo. Por eso las plantas, en la tierra, y el fitoplancton, en el mar, forman la base de la cadena trófica. La existencia de esos oasis de aguas profundas descubiertos recientemente contradecía el principio de la energía solar imprescindible. ¿Cómo puede existir la vida en un lugar que está permanentemente en total oscuridad? ¿Y con tanta diversidad? Actualmente, hay señales de que la riqueza de especies de las aguas profundas es equivalente a la de los arrecifes de coral o los bosques húmedos. Por supuesto, de vez en cuando cae materia muerta de la superficie que los animales pueden comer, pero eso sucede en tan poca cantidad que no bastaría para sostener el enorme número de criaturas que habitan cerca de las fuentes. Llamó la atención que los animales se arremolinasen cerca de las fuentes y no se encontraran mucho más allá. Rápidamente quedó claro que, al igual que el fitoplancton en la superficie, allí había otros microorganismos que se encargaban de sostener la vida. En lugar de bacterias y arqueas fotosintéticas, la base de la cadena trófica de las fuentes hidrotermales es quimiosintética: en lugar de la luz solar, utilizan reacciones redox para crear azúcares a partir de dióxido de carbono. Ya sé que esto lo odiamos en el colegio y no quiero revivir traumas antiguos, pero es la base de las reacciones que crean o almacenan energía. Vamos a

explicarlo brevemente.

Redox es la abreviatura de «reacción de reducción y oxidación» y, básicamente, consiste en que los electrones, a menudo en forma de oxígeno, pasan de un átomo a otro y, durante este proceso, se libera energía. La parte oxidativa de la reacción es la incorporación de electrones, y la reducción es la entrega de los mismos. Ya está, no ha sido para tanto, ¿no?



Para esta reacción, los microorganismos quimiosintéticos utilizan los compuestos minerales disueltos en el humo. Por ejemplo, en las fumarolas negras se usa ácido sulfhídrico y se oxida a azufre con ayuda del oxígeno; al mismo tiempo, el oxígeno se reduce a agua. De forma análoga a la fotosíntesis, se forma una cadena de transporte de electrones que genera energía que se puede usar para crear azúcares a partir de dióxido de carbono. En las reacciones redox también se pueden usar otros compuestos, como hierro, metano o manganeso. Estos microorganismos quimiosintéticos son extremadamente resistentes al calor y nadan o crecen como una película biológica en torno a las chimeneas calientes, en un número tal que forman auténticas alfombras. Luego, animales como gambas o crustáceos se los comen, los bivalvos y las larvas los filtran del agua. Algunos animales han encontrado un sistema aún más sencillo, dando cobijo a esos microorganismos en sus tejidos y proporcionándoles comida directamente; como contrapartida, los microorganismos reciben un espacio cómodo para vivir y protección contra depredadores hambrientos. El ejemplo más conocido de esta simbiosis es el gusano de tubo gigante o *Riftia pachyptila,* que vive en tubos anclados a una chimenea que nunca abandona y en los que se puede esconder en caso de peligro; los tubos, que crecen con el gusano, pueden llegar a medir 1,5 metros de largo. Cuando afuera está tranquilo, saca la cabeza, que se parece a una pluma y tiene penachos de un llamativo color rojo. Los penachos le sirven para mover el agua cargada de ácido sulfhídrico y alimentar a las bacterias de sulfuro simbióticas. Las bacterias viven dentro del gusano, en un órgano especial que ocupa

casi un tercio de su cuerpo, y producen azúcares que comparten con él. La simbiosis está tan optimizada que el *Riftia* no tiene ni boca ni ano, porque no los necesita. Lo que sí ha desarrollado es un tipo especial de hemoglobina para poder lidiar con el altamente venenoso ácido sulfhídrico. La hemoglobina es el componente sanguíneo rojo que normalmente transporta el oxígeno y el dióxido de carbono. En el *Riftia* también transporta el ácido sulfhídrico a los simbiontes sin dañar las células del gusano. El alto contenido de hemoglobina es lo que hace que el gusano sea de un rojo tan llamativo.

Así, los microorganismos quimiosintéticos forman la base de la alimentación y sin ellos no habría vida en las fuentes de aguas termales. Las fuentes hidrotermales son el único ecosistema independiente del sol de la Tierra, al menos parcialmente, ya que los microorganismos oxidan sustancias con oxígeno, lo que los hace dependientes del sol de manera indirecta, porque, que se sepa, solo se crea oxígeno a través de la fotosíntesis.

Otro ecosistema relacionado con las fuentes hidrotermales, pero que se desarrolla a cientos de metros de ellas, sigue estando en la oscuridad, también en sentido figurado. Se sabe poco de su importancia en la circulación de oxígeno en los océanos. Se trata de las nubes hidrotermales. El humo de las fuentes hidrotermales sube de las chimeneas, ya que el agua caliente es menos densa y, por tanto, más ligera que el agua fría de las profundidades. Mientras el humo asciende cientos de metros, se va enfriando y mezclándose con el agua que lo rodea hasta que acaba adquiriendo la misma densidad. A partir de ese momento, ya no sigue subiendo, sino que se distribuye horizontalmente en la capa de agua, como una nube, hasta una distancia de cien kilómetros. Aun cuando el humo ya se ha mezclado, todavía sigue distinguiéndose del agua circundante por las sustancias disueltas en él. Es algo parecido a lo que ocurre en una sala de fumadores o un bar de *sishas*: el humo espirado sube hasta el techo, donde va distribuyéndose poco a poco por toda la sala y mezclándose con el aire del ambiente, hasta que los ojos pican.

Como hemos aprendido antes, cuando el humo recién salido de la chimenea sube, reacciona con el agua fría que contiene oxígeno, de modo que algunas sustancias se depositan o se oxidan. Las sustancias que no se reaccionan inmediatamente siguen ascendiendo por la columna de humo junto con microorganismos que se van oxidando y reduciendo alegremente en su viaje hacia arriba, pero también otros microorganismos y virus de capas más altas de agua se benefician de esa suculenta nube hidrotermal. Esas nubes llenas de bacterias son como un bufet libre para el zooplancton, en particular, los copépodos, la especie más importante y frecuente de zooplancton marino, tienen una vida maravillosa en las zonas sobre las nubes; las larvas de

habitantes de las fuentes hidrotermales se sienten como en casa en esas nubes, y las aprovechan para viajar a chimeneas y fuentes más alejadas.

Las fuentes hidrotermales no solo crean un hábitat único en su entorno directo, también en muchos kilómetros a la redonda en la columna de agua. Una pregunta aún sin respuesta es si los animales más grandes también muestran interés por la nube como fuente de alimento. Esa incertidumbre responde al hecho de que una nube kilométrica así no es fácil de distinguir en el océano profundo, ya que, cuando se envían submarinos o cámaras, solo se ve una pequeña parte de lo que sucede en realidad; también las redes y la toma de muestras cubren un área comparativamente pequeña. Es un poco como entrar en un gimnasio la primera semana de enero y pensar que todo el mundo en la ciudad está haciendo ejercicio: de haber entrado en abril, la impresión sería muy diferente. Es decir, que el tiempo es un aspecto importante: que en el breve periodo en el que se está allí no se vea nada no quiere decir que no haya nada.

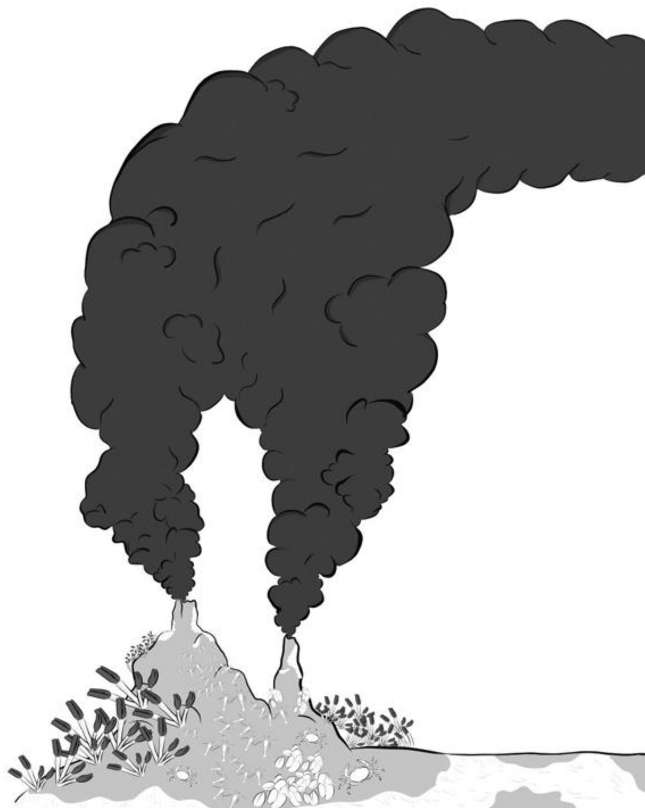
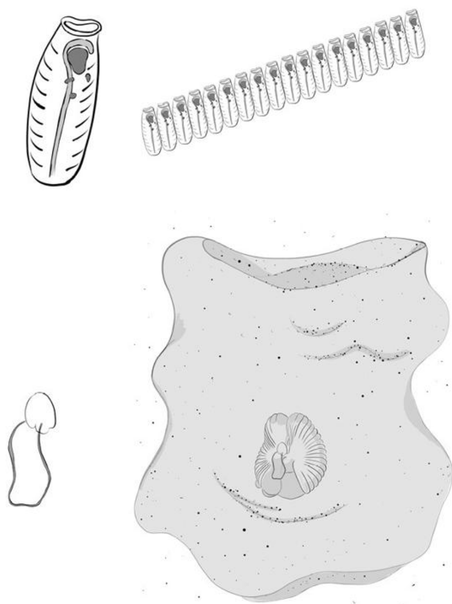


Imagen esquemática de una fumarola negra con los habitantes típicos de las fuentes hidrotermales, como *Riftia*, gambas, crustáceos y microorganismos que forman alfombras blancas. Sobre ellos se levanta la nube hidrotermal. Sin embargo, en realidad nunca se encuentran todas las especies en una sola fuente

porque cada fumarola tiene su propia composición de especies.

A pesar de las difíciles condiciones, ha habido avistamientos de colonias de taliáceos en nubes hidrotermales, aunque estos animales no suelen encontrarse en ese tipo de aguas profundas. Los taliáceos pertenecen a los tunicados y se alimentan de plancton que filtran del agua. Como individuos son poco espectaculares, miden un par de centímetros y parecen un trozo de tubo traslúcido; sin embargo, cuando forman colonias grandes, pueden alcanzar tamaños imponentes de varios metros de largo. También se ha visto otro tipo de tunicados, las *Larvacea*. Este organismo semejante a un renacuajo se consideraba antiguamente (y de forma incorrecta) una larva, de ahí su nombre. Estos no forman colonias como los taliáceos, sino una impresionante «casa» de mucosa cientos de veces más grande que el propio animal y que usan para filtrar alimento del agua. Esa variedad de especies de zooplancton debería atraer depredadores más grandes, como peces, siempre que puedan nadar a tanta profundidad. La comunidad científica ya ha encontrado una mayor diversidad de peces en las aguas superficiales cercanas a fuentes hidrotermales, lo que podría indicar que los peces se alimentan del zooplancton de las nubes.



Arriba a la izquierda, un taliáceo individual. A la derecha, una colonia, que puede llegar a medir varios metros. Abajo a la izquierda, una *Larvacea*, parecida a un renacuajo. A la derecha, con la espectacular «casa» de mucosidad.

Suponemos que también los rorcuales comunes visitan este bufet de

vez en cuando. Los equipos de investigación han aprovechado los Ocean Bottom Seismometer repartidos por el lecho marino de la falla Endeavour, una zona volcánica activa. Esta falla se encuentra a dosmil metros de profundidad en el Pacífico, en la costa oeste del continente norteamericano, justo entre Estados Unidos y Canadá. Es una región de unos noventa kilómetros de largo, con mucha actividad volcánica y un gran número de campos de fuentes hidrotermales. Aunque los sismógrafos están pensados para medir terremotos, resulta que también son perfectos para estudiar ballenas barbadas, como el rorcual común y la ballena azul: además de los movimientos del lecho marino, pueden medir las ondas de sonido del agua con ayuda de un hidrófono. También captan los cantos de las ballenas, que, en el caso de la ballena azul, está en el rango de los dieciséis hercios y, en el del rorcual, en el de los veinte hercios. Estos datos muestran que algunos rorcuales comunes no migran al sur en otoño como la mayoría de sus congéneres, sino que se agrupan en torno a la falla Endeavour. Como los rorcuales comunes bien educados no cantan con la boca llena, las pausas frecuentes y prolongadas en el canto indican que las ballenas comen allí; teniendo en cuenta que todo sucede en torno a la falla Endeavour, suponemos que se alimentan del plancton de nubes en invierno. El Sharkano ya mencionado es uno de los pocos ejemplos en los que se ha observado que peces de arrecife y tiburones se encuentran directamente en la nube. También se han avistado tortugas laúd marcadas con emisores por satélite dando vueltas en torno al Sharkano. El comportamiento que mostraban durante el día era el típico de la búsqueda de alimento, por lo que se asume que utilizan el volcán como fuente de alimento. Los indicios apuntan entonces a que los animales de capas superiores del agua y de niveles superiores en la cadena trófica se alimentan del ecosistema de nubes de aguas profundas.

Esto podría tener un gran impacto en el intercambio de sustancias en el mar: puesto que los animales suelen quedarse en capas más altas del agua después de comer, también defecan ahí o incluso son presa de otros animales. De este modo, los nutrientes de las profundidades pasan a las capas superiores de agua. Esto es importante porque esas capas superiores dependen de determinados aportes de nutrientes, como el hierro. Este micronutriente esencial es necesario para los habitantes fotosintéticos del mar, pero falta en muchas regiones; por ejemplo, en el Atlántico norte, la arena del Sáhara que el viento lleva al interior del océano es una fuente importante de hierro. Actualmente, también se asume que el hierro que sube con las nubes hidrotermales desempeña un papel importante como abono para el fitoplancton. Los últimos estudios demuestran que las nubes podrían ser el origen de enormes florecimientos de algas en el océano

Antártico, una región muy pobre en hierro. Se ha investigado poco hasta qué punto las fuentes hidrotermales y sus nubes influyen en la flora y fauna de los mares del mundo, de modo que aún nos pueden deparar muchas sorpresas.

El increíble descubrimiento de las fuentes hidrotermales de aguas profundas y sus habitantes no solo ha supuesto un tremendo avance para la biología, sino también para la biotecnología y, con ella, la medicina. El hecho de que pueda existir vida a 121 °C es una novedad sensacional; desde el punto de vista de la genética, esos lugares son todo un tesoro. Las enzimas resistentes al calor obtenidas de estos extraordinarios microorganismos han podido mejorar enormemente aplicaciones biotecnológicas, como la reacción en cadena de la polimerasa, o PCR, que se utiliza para reproducir ADN y que se ha hecho famosa mundialmente a raíz de la pandemia de coronavirus. El descubrimiento de distintos organismos quimiosintéticos ha provocado que surjan nuevas teorías sobre el origen de la vida en la Tierra: las fuentes hidrotermales existen desde hace 4.200 millones de años y se consideran uno de los lugares en los que es probable que se originara la vida. En laboratorios que imitan las condiciones ambientales de las fuentes hidrotermales, se ha podido comprobar que se pueden formar espontáneamente burbujas de ácidos grasos que se asemejan a un antecesor de las primeras células. Si ese es realmente el origen de la vida, es posible que algunos de los microorganismos que viven allí actualmente tengan reliquias funcionales de los primeros microorganismos que existieron; sumergirse en ellos sería como viajar en el tiempo al origen del mundo.

A pesar de ser poco accesibles, los ecosistemas de aguas profundas, como las fuentes hidrotermales, están amenazados; como suele ocurrir, el surgimiento de nuevas tecnologías no solo ha mejorado las posibilidades de investigar el océano profundo, sino también su explotación. Se está impulsando mucho la minería de aguas profundas por los yacimientos de sulfuros y de manganeso, que contienen metales muy importantes para la economía, como cobre, níquel, cobalto o incluso oro. No obstante, también se critica mucho esta minería, porque conlleva el peligro de destruir ecosistemas de aguas profundas imposibles de recuperar. Hasta ahora, se ignoraban los posibles efectos que estas intervenciones podrían tener también en ecosistemas de capas superiores, como las nubes hidrotermales, pero ya deben incluirse en la conversación. Aún estamos comenzando a entender estos hábitats y su importancia para el resto del ecosistema del mar e, indirectamente, para la humanidad, de modo que todavía no podemos estimar las consecuencias que podría tener su destrucción. Vivimos en una era en la que somos cada vez más conscientes del daño irreversible que hemos causado a la naturaleza a

lo largo de los siglos, de modo que debemos aprender de nuestros errores y no destruir conscientemente los últimos hábitats vírgenes de nuestro planeta.

Bailarines acuáticos de seis patas

En *El país del fin del mundo*, el autor Terry Pratchet describe cómo el dios de la evolución va creando nuevos animales durante horas en su fascinante y grotesco Mundodisco. Debe hacerlo a mano porque todavía no ha inventado el sexo y los animales aún no pueden reproducirse por sí mismos. Su animal favorito, el que más le gusta y el que crea más a menudo, es el escarabajo. Para ello, Terry Pratchet se inspiró en el mundo real: los escarabajos son el orden con más especies de la Tierra, más de cuatrocientas mil, y pertenecen a la clase de los insectos, la clase más diversa del reino animal, con una estimación de más de un millón de especies.

A quién no le ha pasado: moscas que revolotean molestamente por la cara aunque acabes de espantarlas; mosquitos que te roban el sueño con su zumbido y al día siguiente te destrozan los nervios cuando las picaduras empiezan a picar, por no hablar de las enfermedades que pueden transmitir; avispas arremolinadas sobre cubos de basura, siempre listas para atacar a cualquier persona desprevenida que quiera deshacerse de la basura como se debe, o pulgas que convierten a los huéspedes de un hotel en monstruos llenos de pústulas. La lista podría seguir indefinidamente, ya que la mayoría de los insectos se consideran invitados no deseados, excepto las mariposas o las mariquitas, quizás. A nadie le sorprende que existan tantas especies de insectos, cada día tenemos que lidiar con ellos, tanto dentro como fuera de casa. Pero ¿os habéis dado cuenta de que hay un lugar en el que te dejan en paz? En efecto: en el mar, porque en el mar prácticamente no hay insectos.

Resulta muy llamativo que en el mayor y el más diverso ecosistema del planeta no exista casi ningún representante de la clase de animales con más especies. ¿Cómo puede ser?

Para evitar malentendidos, cuando digo «mar», me refiero a dentro del agua o directamente sobre ella lejos de tierra firme. Quienes se las han visto con moscas de arena, y es algo que nadie desea, saben que en playas, en marismas salinas, en manglares o en agua salobre hay que luchar contra los insectos. Por el contrario, hay muy muy pocos insectos que sean exclusivamente marinos, es decir, que pasen toda su vida bajo o sobre el agua. Por ejemplo, los *Halobates* están como pez en el agua, literalmente. No solo se parecen a los zapateros que podemos encontrar en estanques o lagos, también pertenecen a la misma familia, *Gerridae*, pero los zapateros marinos no forman alas en ningún estadio de su vida, a diferencia de sus parientes de agua dulce.

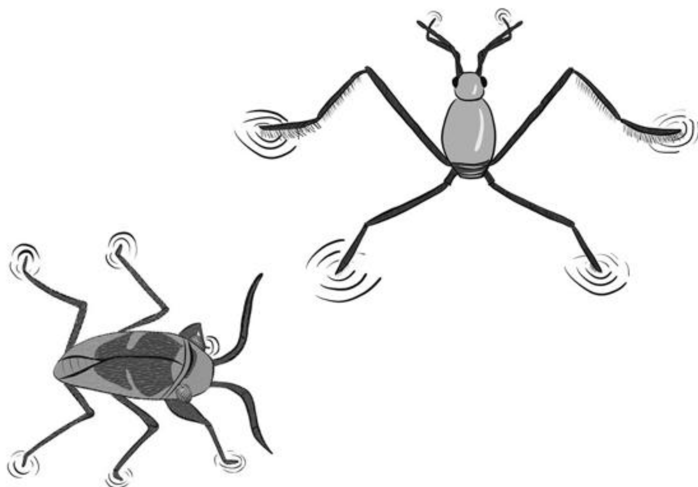
De momento, existen cuarenta y seis especies de *Halobates* descritas, aunque eso puede cambiar rápidamente. La mayoría de especies vive en la costa y en manglares, pero cinco especies (*H. germanus*, *H. micans*, *H. sericeus*, *H. sobrinus* y *H. splendens*) pasan toda su vida en mar abierto. Se encuentran en las regiones tropicales del Atlántico, en el Índico, en el mar Rojo y las cinco especies son endémicas de las regiones tropicales del Pacífico. Lo importante es que el agua esté caliente, de hecho, parecen sentirse mejor a temperaturas de entre 24 °C y 30 °C. El cuerpo del *Halobates*, de un color gris plateado a la luz del sol, es relativamente pequeño, de solo 0,5 centímetros, en comparación con los 1,5 centímetros de sus patas. Las extremidades largas son necesarias para poder sostenerse sobre la superficie del agua; en caso de que el agua los empuje hacia adentro o les salpique, vuelven a la superficie como un corcho gracias a varias capas de pelos hidrófugos que contienen aire. A pesar de estas medidas de protección, el hecho de que estos insectos pasen toda su vida en mar abierto, con tantas tormentas y oleajes, es fascinante. Además de las condiciones meteorológicas, tienen que enfrentarse a otras dificultades a lo largo de su existencia.

Por ejemplo, la reproducción: para poder poner los huevos, los zapateros necesitan algo que flote en la superficie, como semillas, trozos de madera o plástico, piedra pómez o plumas, no son quisquillosos, aprovechan lo que haya. Durante una expedición, se encontraron más de 70.000 huevos de *Halobates* en un trozo de plástico que flotaba en el mar, lo que indica que el material sobre el que colocar los huevos escasea en mar abierto.

La comida también escasea en el océano. Los *Halobates* se alimentan principalmente de zooplancton, animales marinos muy pequeños como organismos unicelulares, crustáceos, medusas o larvas que nadan demasiado cerca de la superficie y caen en las garras de los insectos, porque no pueden sumergirse en busca de presas. Por desgracia, no siempre hay plancton en todos los lugares y, como los *Halobates* tienen un radio de movimiento más bien pequeño debido a su tamaño y a que dependen de los vaivenes del mar, a veces tienen que comerse a sus congéneres. Aparte del canibalismo por necesidad, generalmente son presa de pájaros marinos o de peces, como los jureles; como en mar abierto es difícil esconderse, su única oportunidad frente a los depredadores es correr, y corren bastante rápido, a 1 metro por segundo (3,6 km/h), tan rápido que a veces son capaces de esquivar las redes si sus barcos no son lo suficientemente rápidos.

Otro género de zapateros también se ha adaptado al mar abierto, los *Hermatobates*, el único género de la familia hermana de los zapateros, *Hermatobatidae*. Los *Hermatobates*, llamados «corredores de arrecife»

en una traducción libre del griego, son extremadamente raros y difíciles de encontrar; pocos saben dónde y cómo pillarlos de la mejor manera posible. Se capturan en el agua con redes, o bien se peinan los techos de arrecifes de coral en su búsqueda. El entomólogo Jon L. Herring dijo una vez que solo había podido encontrar tres ejemplares durante dos años y medio de trabajo en el Pacífico. Actualmente, se han descrito catorce especies, de las cuales *H. schuhi* y *H. palmyra* se descubrieron en 2012. Su hábitat es los arrecifes de coral, por eso se encuentran en las regiones tropicales del Pacífico, Atlántico, Índico y el mar Rojo. Tienen un cuerpo redondo que recuerda al de un escarabajo que, en función de la especie, mide entre dos y cuatro milímetros; las piernas no son tan largas como las del *Halobates*, pero lo suficiente para correr por la superficie del agua, porque tampoco tienen alas, pero sí una densa capa de pelos hidrófobos que les rodea todo el cuerpo. Antes de sumergirse, estos pelos almacenan aire que resulta importante para respirar. Los insectos no respiran como las personas, por la boca, sino a través de un sistema traqueal: tubos distribuidos por todo el cuerpo con respiraderos que permiten que entre el oxígeno y salga el dióxido de carbono. Esa capa de aire envuelve a los insectos como una campana de inmersión y no solo protege las tráqueas para que no les entre agua, también les da la posibilidad de respirar bajo el agua, donde en caso extremo, pueden sobrevivir hasta doce horas. Pasan la mayor parte del tiempo sumergidos, pero sin contar con su campana, en pequeños agujeros llenos de aire en la parte inferior de rocas y trozos de corales antiguos. Sus madrigueras están en los techos de los arrecifes, en las zonas en las que los arrecifes emergen cuando hay marea baja pero que no se secan por completo. Con la marea baja, los *Hermatobates* salen de sus agujeros y nadan en la superficie para alimentarse y reproducirse; no sabemos qué comen, porque apenas se han podido observar. Suponemos que, como todos los zapateros, son depredadores y se alimentan de otros insectos marinos, como mosquitos y *Halobates* cerca de la costa. En 2019 se publicó por primera vez la imagen de un *Hermatobates* comiendo: incluso el Yeti se ha fotografiado más veces. Sí se ha observado su apareamiento en la superficie del agua, pero las tímidas hembras desaparecen a tal velocidad que aún no hemos podido averiguar cómo y dónde ponen los huevos.



Izquierda: *Hermatobates.* Derecha: *Halobates.*

Las larvas del género *Pontomyia* (*pontos* signifca «mar abierto» y *myia* es «mosca» en griego), parte de la familia de los quironómidos, fueron los primeros insectos submarinos observados nunca. Su descubridor, el entomólogo Patrick Alfred Buxton, fue la primera persona en capturar moscas en Samoa en 1925 y pensaba que pasaban todos los estadios de su vida bajo el agua, pero se equivocaba: los mosquitos adultos no vuelan, pero viven en la superficie, no bajo el agua. Actualmente, se han descrito cuatro especies (*P. pacifica*, *P. cottoni*, *P. natans* y *P. oceana*) de estos mosquitos marinos sin alas que solo se dan en el Indo-Pacífico. También parece que hay una especie de *Pontomyia* en el Caribe, pero no se ha podido describir correctamente y, por tanto, no tiene nombre de especie. Hasta entonces solo se habían podido describir larvas y hembras adultas, pero faltaban los machos. Atrapar un ejemplar adulto de mosquito *Pontomyia* es todo un desafío debido a su ciclo vital extremo: solo disfrutan de entre una y tres horas de su forma final.

El ciclo vital de estos insectos marinos es algo así: los huevos se ponen en unos tubos gelatinosos en el agua del mar, allí nacen todas las larvas de los huevos, las larvas pasan un año bajo el agua, alimentándose de algas y hierba marina, por eso se encuentran las larvas blancas, parecidas a gusanos de la harina, cerca de la costa y en lagunas poco profundas. Cuando llega el momento, pasan a ser pupas y, al igual que las mariposas, las larvas pasan a la forma adulta de mosquito. Estas pupas se deslizan por la superficie y casi todos los mosquitos salen de la pupa al mismo tiempo. ¡Cuando solo tienes tres horas, hay que planearlo todo muy bien! Luego, los mosquitos se dedican a su última y única misión: la reproducción. Y por eso únicamente tienen lo que necesitan: órganos reproductores, patas y alas, por lo menos los machos, las hembras solo son una especie de

saco con forma de gusano lleno de órganos reproductivos que flota en la superficie del agua. Por su parte, los machos se parecen a los mosquitos normales que vuelan a nuestro alrededor en verano, pero estos no pueden picar. Tienen un tamaño similar, de unos 1,5 milímetros, pero su parte trasera es más gruesa y de color verde jade, y las alas son en realidad remos; los machos nadan usando las alas, por eso se considera que esta especie de mosquito no tiene alas, aunque sí las tiene, pero no para volar. Así, los machos nadan hacia las hembras, las agarran con las patas, se aparean y ayudan a poner los huevos antes de intentar aparearse con otra hembra si tienen tiempo suficiente. Después de eso, la función se acaba y los mosquitos mueren con el trabajo hecho, no hay tiempo para conocerse y cenar, porque tanto la boca como el tracto digestivo se han perdido. El hecho de que la forma adulta solo sirva para reproducirse y tenga una vida muy corta no es algo infrecuente en los insectos, pero una vida de solo tres horas como máximo es más raro. Este puede ser el motivo por el que se tardara tanto en descubrir estos mosquitos marinos. Se encuentran más fácilmente en lagunas poco profundas, en noches de luna llena o luna nueva: entre diez y quince minutos después de ponerse el sol, aparecen los primeros machos, unos veinte minutos después aparecen las hembras. Esto, que puede parecer un conjuro de brujas novatas, es en realidad una recomendación para aquellos que quieran atrapar un par de estos mosquitos, porque, en realidad, parece que tanto el estadio de pupa como el nacimiento de los mosquitos adultos está controlado por la luz solar y el ciclo de la luna. Por lo demás, es un misterio cómo este género de mosquitos se ha podido expandir por tantos lugares del mundo, teniendo una forma adulta con una vida tan corta y unas larvas cuya probabilidad de supervivencia es del 5 %. Las teorías más comunes suponen que las larvas se han distribuido por nuevas regiones en maderos o a lomos de tortugas.

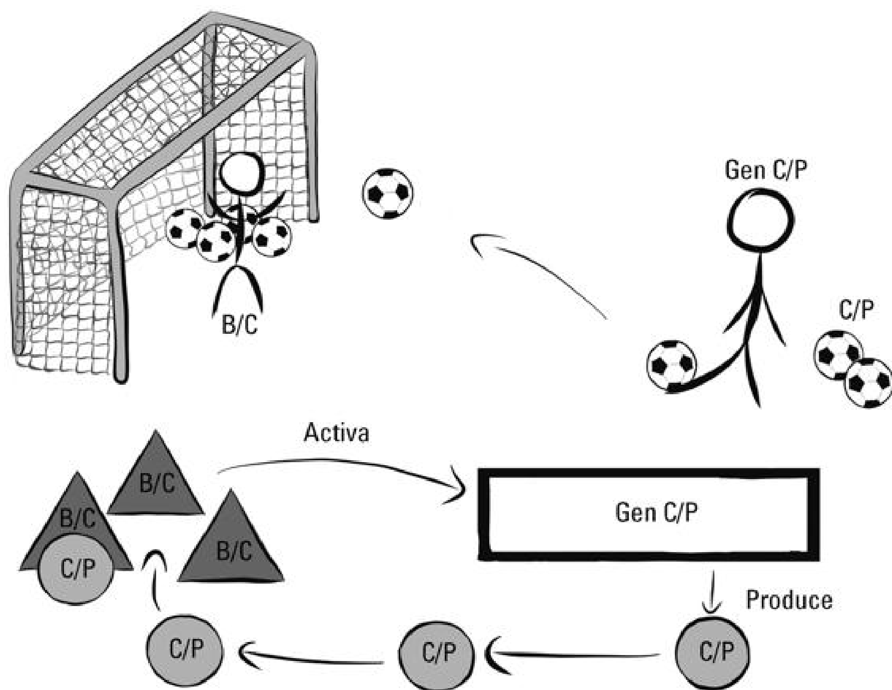
Es posible que ahora estés pensando que, por suerte, aquí en Europa no tenemos de esos insectos asquerosos en el mar, pero no, por supuesto que aquí también hay algunos, ya que, siempre que un hábitat ofrece espacio, alguna forma de vida lo ocupará. Los quironómidos marinos que se encuentran en la costa atlántica de Europa se llaman *Clunio marinus*, pero no te preocupes, tampoco son de los que pican. Aunque se podría argumentar que estos mosquitos no son exclusivamente marinos, quiero mencionarlos aquí, por un lado, porque son nativos de Europa y, por otro, porque son muy conocidos para la ciencia a diferencia de otros insectos marinos. Se utilizan a menudo para entender mejor los ritmos circadianos de los animales, es decir, su reloj interior. «Circadiano» viene del latín y quiere decir «en torno al día». Aceptando que todos los seres vivos tienen un reloj interno, ya que es importante para su supervivencia. La

rotación de la Tierra crea días de veinticuatro horas con una fase oscura, la noche, y otra de luz, el día. Estos periodos oscuros y luminosos no solo modifican las condiciones ambientales, como la temperatura, también hacen que de día sea más fácil a los depredadores ver a sus presas o, de noche, sea más fácil cazar al abrigo de la oscuridad, todo es una cuestión de adaptación. Sin embargo, todos los organismos tienen que reaccionar a estos cambios continuos durante el día, y eso es lo que controla el reloj interno que hace tic tac en nuestras células.

Esto quiere decir, por ejemplo, que no decidimos de forma consciente que tenemos sueño porque afuera está oscureciendo, sino que ese proceso tiene lugar en nuestras células a nivel molecular. Lo interesante es que este ritmo interno de unas veinticuatro horas aproximadamente es independiente de los estímulos externos. No obstante, como el ritmo no es exactamente de veinticuatro horas y hay desfases, aprovecha los estímulos externos, como la luz del sol, para corregirlos. A estos estímulos se les llama *zeitgeber* o «sincronizadores». Un ejemplo muy conocido de cómo se puede desajustar el reloj interno es el *jet lag*: al viajar a un país al oeste de donde estamos, el día se vuelve más largo de lo que esperábamos y, a mitad del día, ya estamos muy cansados. Si viajamos al este, no podemos dormir por la noche porque el reloj interior piensa que es por la tarde. Sin embargo, los vuelos de larga distancia no nos condenan de por vida, ya que el cuerpo puede reaccionar a los cambios en los ritmos del día con ayuda de los *zeitgeber* y adaptarse relativamente rápido a las nuevas circunstancias.

Los procesos moleculares del reloj interno son muy complejos y pueden ser extremadamente distintos en diferentes especies animales. La base fundamental del reloj interno es la activación e inhibición de genes en las células: por ejemplo, existen las proteínas de activación BMAL1 y CLOCK, que activan todas las mañanas los genes *Chryptochrome* y *Period*; esa activación produce las proteínas CRY y PER. Estas proteínas se combinan en un complejo que viaja al núcleo de la célula y se une a las proteínas de activación, BMAL1 y CLOCK, inhibiéndolas. Esta inhibición hace que los genes *Chryptochrome* y *Period* no se activen más y se producen cada vez menos proteínas PER y CRY, de modo que la concentración de estas en las células va cayendo con el tiempo. Como hay menos proteína CRY/PER, los genes se inhiben menos y la producción de CRY/PER aumenta. Este ciclo eterno de activación e inhibición define el ritmo de veinticuatro horas de las células. Podemos imaginarlo como un entrenamiento de fútbol: el portero (proteínas de activación) está en la portería y lanza balones a un jugador (gen C/P). El jugador se activa mediante esos balones y chuta de vuelta al portero cuando ha acumulado unos cuantos

balones. El portero debe parar los balones que le vienen de vuelta (proteína CRY/PER), por lo que puede mandar menos balones al jugador. En un momento dado, el portero vuelve a tener todos los balones: cuando se llega a ese punto, las veinticuatro horas han pasado y el ciclo vuelve a comenzar.



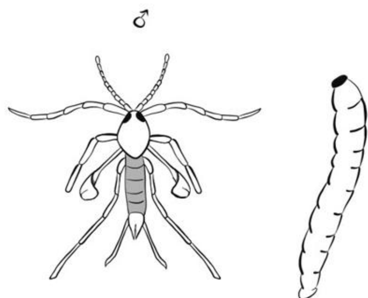
Las proteínas de activación BMAL1 y CLOCK (B/C) activan los genes *Chryptochrome* y *Period* (genes C/P). Estos producen las proteínas CRY y PER (C/P), que se unen a las proteínas activadoras y las desactivan. Esto inhibe su propia producción, y su concentración baja hasta que, después de veinticuatro horas, hay tan pocas que las proteínas activadoras vuelven a activarse y el ciclo vuelve a comenzar.

El ciclo que acabamos de explicar es solo una parte de un proceso molecular del reloj interno más complejo, pero nos permite hacernos una idea de cómo funciona todo en las células. En 2017, el Premio Nobel de Medicina (como ya hemos comentado, no existe ninguno de biología) fue para Jeffrey Hall, Michael Young y Michael Rosbash por descifrar las bases moleculares del ritmo circadiano en la mosca de la fruta *Drosophila melanogaster*. La *Drosophila*, como se conoce coloquialmente entre los biólogos, es famosa mundialmente: es una pequeña mosca de la fruta que sale en masa de fruteros y cubos de basura en verano, casi no hay manera de librarse de ellas. No obstante, la *Drosophila* no es la única mosca que se utiliza para

aprender más sobre el reloj interno, sino también (y aquí es donde volvemos a nuestros insectos marinos) el mosquito marino *Clunio marinus*. Es posible que no sea tan exclusivamente marino como los otros insectos mencionados, ya que su forma adulta dispone de alas y puede volar, por lo menos los machos. No obstante, nunca pierde el contacto con el agua y planea sobre ella como un helicóptero. Es muy parecido a la *Pontomyia* tanto en su ciclo de vida como en su aspecto, ya que ambas especies forman parte de los quironómidos. Sus larvas viven bajo el agua cerca de la costa y se alimentan de algas. Las larvas de *C. marinus* se construyen una cubierta protectora de pequeñas piedras, arena y gravilla, por lo que son fáciles de distinguir de las larvas de *Pontomyia*, aunque se parezcan. También pasan a pupa, se impulsan a la superficie y la forma adulta sale de la pupa para aparearse, con la misma presión de una a tres horas para reproducirse. Estos mosquitos lo tienen más complicado, ya que no pueden poner los huevos en el mar sin más, necesitan una franja de suelo marino seco, de modo que el nacimiento se debe producir preferiblemente con marea muerta, la marea más baja del mes, y estar perfectamente sincronizada. Las mareas alta y baja se alternan cada doce horas y veinticinco minutos, con un desfase diario de cincuenta minutos entre las horas de marea baja. También la intensidad de las mareas depende de la fase de la Luna, que a su vez está relacionada con la rotación de la Tierra, haciendo que los puntos altos y bajos máximos estén desfasados en lugares alejados pocos kilómetros entre sí. Por todo esto, las poblaciones de *C. marinus* deben estar adaptadas con exactitud a sus lugares: poblaciones de distintos sitios nacen en momentos diferentes de diferentes días.

Este fenómeno es lo que hace que estos mosquitos sean únicos y especialmente interesantes para la investigación. ¿Los mosquitos tienen determinadas las fases lunares que regulan las mareas a nivel molecular o eso sucede mediante *zeitgebers* externos como la luz de la Luna? Para ello, se han reunido mosquitos de dos poblaciones distintas y se han mantenido en sus condiciones de laboratorio habituales. Los ejemplares procedían de lugares en los que la marea muerta no se produce el mismo día: unos de Normandía, otros de la costa vasca. De media, los mosquitos de Normandía nacieron cuatro horas antes del anochecer del cuarto día del ciclo lunar, mientras que los mosquitos vascos nacieron, de media, una hora después del anochecer del duodécimo día del ciclo lunar. Al cruzar estas dos poblaciones entre sí y observar la descendencia, pasó lo siguiente: de media, los descendientes nacieron dos horas antes del anochecer del séptimo día del ciclo lunar. El comportamiento de nacimiento de los descendientes está justo entre los de sus progenitores. Los descendientes se mantuvieron en las mismas condiciones que los

progenitores, siendo la mezcla genética la única diferencia. Este estudio pudo demostrar por primera vez que no solo existe un reloj interno para medir el día, sino que el reloj interno molecular controla la medición de las fases lunares, el ritmo circalunar. Así, estos pequeños mosquitos ayudaron a impulsar la investigación de los ritmos circalunares, que desempeñan un papel principal en el mundo marino, sobre todo en la reproducción.





Arriba: mosquito adulto y larva de la *Pontamyia sp*. Abajo: reproducción del *Clunio marinus.*

¿Por qué tan pocos insectos han conquistado el ecosistema marino? La ciencia tiene varias teorías; en concreto, cinco en los últimos treinta años. En 1996, Jeroen van der Haag postuló que los insectos nunca han conseguido establecerse en el mar porque viven en contacto estrecho con angiospermas o plantas con flor. Muchas especies de insectos son polinizadoras importantes para esas plantas, con las que están casi en simbiosis. A lo largo de la evolución, algunas plantas e insectos se han adaptado mutuamente de tal manera que son completamente dependientes entre sí. El papel de los insectos como polinizadores es tan importante que la muerte de estos que se observa actualmente puede tener también consecuencias dramáticas para la producción de alimentos para humanos, porque las plantas que más utilizamos necesitan de la polinización antes de que nuestra fruta y verdura pueda crecer.

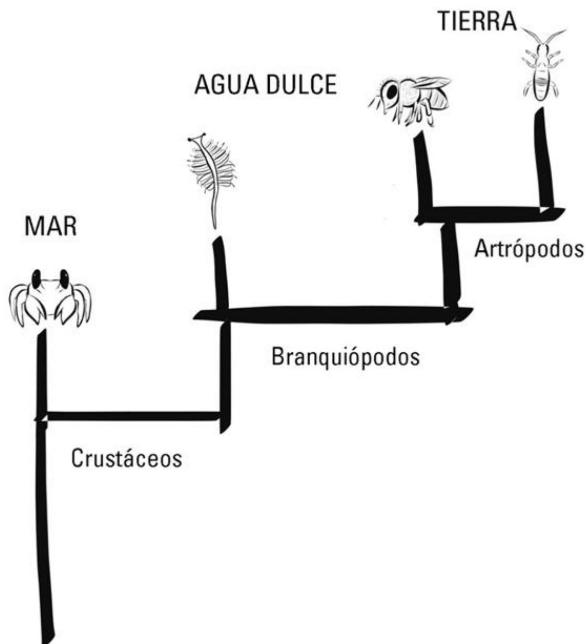
La idea de Van der Haag es la siguiente: si no hay plantas con flor, no puede haber insectos, y en el mar apenas hay, los pastos marinos son las únicas plantas con flor que crecen allí. En 1998, Jeff Ollerton y Duncan McCollin argumentaron que los insectos ya existían doscientos millones de años antes que las plantas con flor y, actualmente, hay muchos insectos que no son polinizadores. Simon H. Maddrell sugirió que la falta de insectos en el mar se debe a que la abundancia de peces significa una presión depredadora demasiado alta. El sistema traqueal que los insectos utilizan para respirar supone un obstáculo a la hora de sumergirse y esconderse, y quedan a merced de sus depredadores. En 2000, Geraat J. Vermeij y Robert Dudley determinaron que muy rara vez se produce un cambio de hábitat entre tierra firme, agua dulce y mar, ya que las diferencias entre los hábitats son muy drásticas. Los invasores de otros entornos a menudo no tienen ninguna oportunidad frente a las especies nativas, bien adaptadas, por lo que no consiguen encajar. Su opinión es que, en el caso de los insectos, el cambio de hábitat de la tierra al mar es demasiado difícil.

En 2007, Graeme D. Ruxton y Stuart Humphries contradijeron ambas teorías, señalando que en agua dulce y en grandes profundidades hay muchos insectos distintos, como muestran los hallazgos de larvas de quironómidos a 1.360 metros de profundidad, en el lago Baikal, o una larva de plecóptero a 80 metros en el lago Tahoe. Incluso existen varias larvas de insectos de agua dulce que tienen branquias; las larvas de caobóridos se enfrentan a los peces que quieren comérselas con un movimiento vertical: de noche, suben a la superficie del agua para alimentarse y durante el día se esconden en el fondo. ¿Por qué no podría suceder lo mismo en el mar? La existencia de más de 45.000 especies de insectos de agua dulce, surgidos a partir de insectos de tierra, sugiere que es posible cambiar de hábitat.

Entonces, ¿por qué no hay más insectos en el mar? La teoría de Ruxton y Humphries tiene que ver con las alas. Casi todos pasan por un estadio, generalmente el último, en el que tienen alas, que suelen desarrollarse después de que hayan completado la metamorfosis a la forma adulta en la pupa o crisálida. Cuando el insecto se libera de ese caparazón, debe desplegar las alas y dejar que se sequen. Esto puede ser posible en un lago, pero imagínate que eres un insecto diminuto en un mar azotado por el viento y las olas. Seguramente, ahí sea difícil lo de dejar secar las alas. Por eso, los insectos marinos que existen, o bien tienen remos, o bien han perdido las alas por completo. El otro aspecto que no me convence es el de tener que poner los huevos en objetos flotantes. Los ejemplos de los *Halobates*, *Hermatobates* y quironómidos demuestran que existen alternativas a estas problemáticas, y seguro que la evolución puede apañárselas para conseguir un saco de huevos flotante y lleno de aire. Por eso, la

siguiente teoría es la que me resulta más interesante.

En 2006, Henrik Glenner y sus colegas publicaron en el artículo «The Origin of Insects» una teoría que sigue un camino totalmente distinto. Para entenderla, tenemos que sumergirnos un poco más en detalle en la biología evolutiva. Los insectos (*Insecta*) pertenecen al subfilo de los hexápodos (*Hexapoda*) y a su vez a la división de los artrópodos (*Arthropoda*). Los hexápodos tienen otras cuatro subdivisiones: los quelicerados (*Chelicerata*), a los que pertenecen las arañas (que no son insectos en realidad), los ya extintos trilobites (*Trilobitomorpha*), los miriápodos (*Myriapoda*) y los crustáceos (*Crustacea*). Esto significa que todos estos subfilos tienen los mismos antepasados. Antes, estos árboles genealógicos y agrupaciones se basaban, por un lado, en fósiles y, por otro, en características morfológicas de los animales, pero la posibilidad actual de secuenciar el ADN de manera sencilla trastocó algunos árboles genealógicos y órdenes, también el de los artrópodos. Tradicionalmente, se partía de la base de que los subfilos de los crustáceos y los hexápodos habían evolucionado de los mismos antepasados. No obstante, los primeros fósiles de crustáceos encontrados en sedimentos marinos tienen unos 511 millones de años, mientras que los primeros fósiles de hexápodos son de hace 410 millones de años, unos cien millones de años después, en el periodo Devónico y, además, los restos no se encontraron en sedimentos marinos. ¿Dónde estuvieron los hexápodos esos cien millones de años? Cuando Glenner y sus colegas examinaron el árbol genealógico de los artrópodos desde una perspectiva genética, se demostró que los hexápodos no son ningún subfilo de los artrópodos, sino que pertenecen a los crustáceos: sus análisis genéticos sugieren que los hexápodos se desarrollaron a partir de la clase de los branquiópodos (a los que pertenecen también los crustáceos prehistóricos) en agua dulce y de ahí pasaron a tierra firme. En aquella época reinaba una gran sequía que obligó a muchos organismos a adaptarse a la vida terrestre para sobrevivir. Volviendo a mi teoría favorita de por qué no hay insectos en el mar: en la época en la que los insectos se adaptaron perfectamente a la tierra, los crustáceos ya se habían aclimatado hacía tiempo al mar y lo habían ocupado. Como los insectos y los crustáceos están emparentados estrechamente, ocupan nichos similares, por lo que están en competencia directa, y por eso hay tan pocos insectos que vivan en el mar, del mismo modo en que apenas hay crustáceos que hayan conseguido establecerse en tierra firme.



Cladograma de la evolución de los artrópodos según Glenner *et al.*

El estudio de Glenner y sus colegas no solo ha revolucionado el árbol genealógico de los artrópodos, también a parte de la comunidad científica. Actualmente, se considera en general que esta teoría es correcta y que los artrópodos son un subfilo de los crustáceos, aunque también se asume que los hexápodos se desarrollaron en tierra mucho antes de lo que se creía, hace unos 485 millones de años, en el Ordovícico. Lo que aún no está claro es si los antecesores de los hexápodos salieron de agua dulce, del mar o de agua salobre.

Independientemente de si es agua dulce o salada, la afirmación de que no hay insectos en el mar no es correcta, ya que los insectos son, en realidad, la respuesta de los crustáceos al hábitat terrestre; de hecho, algunos bichos raros dentro de los crustáceos se han especializado en la vida terrestre, del mismo modo en que algunos insectos han vuelto al mar.

En 2018 se describió una nueva especie de insecto marino: *Dicrotendipes sinicus*. Hasta entonces, este mosquito se había encontrado exclusivamente en balsas artificiales de agua salada en China, en la región en torno a Shanghái, pero se supone que también vive cerca de la costa. Como la *Pontomyia,* pertenece a la familia de los quironómidos, pero forma su propio género. Sus larvas viven bajo el agua y se alimentan de algas, la forma adulta está adaptada al agua, como la de la *Pontomyia,* pero sus alas no sirven como remos, sino como hélice para deslizarse sobre la superficie del agua.

En conclusión, aún no se ha investigado la diversidad y el origen de

los insectos marinos a fondo y, aunque no haya muchos científicos que se ocupen de ellos, estoy convencida de que seguiremos descubriendo más y más cosas en los próximos años.

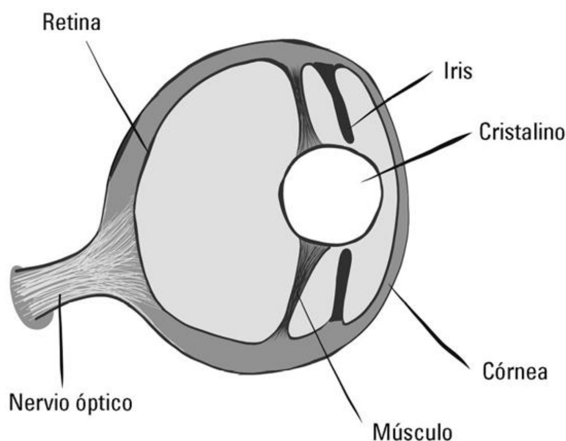
Cómo ven el mundo los peces

Fue una de las grandes preguntas de 2015: ¿el vestido es azul y negro o dorado y blanco? Alguien compartió una imagen de un vestido azul y negro y todo el mundo luchó a muerte en las redes por el color de este. ¿Por qué había tanta gente convencida de que veía el vestido blanco y dorado? También la ciencia lo consideró una pregunta interesante y se volcó en esa ilusión óptica y el enorme grupo de sujetos de pruebas disponible *online*. Se han publicado algunos informes y teorías al respecto: una teoría afirma que la propia percepción del color está influida por la creencia subconsciente de que el vestido se fotografió con luz natural o artificial. En la imagen no se ve ninguna fuente de luz concreta, así que el cerebro tiene que improvisar. Si se interpreta que la luz es natural, se ve blanco y dorado, y si se piensa que la luz es artificial, el vestido se ve azul y negro, pero la ciencia aún nos debe la explicación de cómo surgió esta ilusión óptica.

Hace ya tiempo que se sabe de la existencia de las ilusiones ópticas o visuales: los antiguos filósofos griegos ya intentaron explicar cómo se daban. Algunos creían que se basaban en un procesamiento defectuoso de los estímulos por parte de los órganos sensoriales; otros pensaban que se engañaba al espíritu. Aristóteles opinaba que tanto el espíritu como los órganos sensoriales desempeñaban un papel en que nos dejáramos engañar por las ilusiones ópticas. Su teoría se mantuvo durante los siglos posteriores, y no fue hasta el siglo XIX cuando científicos como Johannes Müller, Hermann von Helmholtz y Johann Joseph Oppel se dedicaron intensamente a las ilusiones ópticas e intentaron explicarlas con experimentos e ilusiones nuevas. Aún se seguía discutiendo si el origen de las ilusiones se daba en el cerebro o en el ojo a causa de la miopía, por ejemplo. Sin embargo, todos coincidían en que estas ilusiones, que suponen una desviación de la norma respecto a cómo vemos el mundo, se podían utilizar para investigar y entender mejor las impresiones sensoriales. En la segunda mitad del siglo XIX surgieron muchas ilusiones ópticas nuevas que aún hoy conocemos y que, entonces, a menudo servían de entretenimiento. También siguen siendo útiles para la ciencia, se utilizan para comprender mejor el sentido de la vista y los procesos psicológicos, neurológicos y fisiológicos relacionados, y no solo de las personas, también sobre las reacciones de los animales a las ilusiones ópticas.

Durante mucho tiempo, se ha excluido de estas a los peces, y eso que sus ojos no son muy distintos de los nuestros; al contrario, tienen una estructura muy similar. Los ojos de los peces se componen de córnea,

pupila, iris, cristalino y retina, como los nuestros, algo que tampoco es sorprendente, porque nuestros últimos antepasados comunes ya habían desarrollado ojos. La mayoría de los peces son capaces de ver colores, incluso en espectros de luz como fluorescencia, luz ultravioleta o luz polarizada, que queda oculta a nuestros ojos. Sin embargo, tienen también algunas peculiaridades desarrolladas naturalmente como adaptaciones al hábitat que los distinguen de los nuestros. La ventaja de vivir en el agua es que no hace falta proteger los ojos contra la sequedad, así que no necesitan párpados, y las lágrimas para limpiarlos también sobran. Para enfocar nuestra vista en un objeto concreto, podemos modificar la forma del cristalino mediante los músculos. Los peces no pueden hacerlo, su cristalino esférico es fijo; para enfocar, echan el cristalino hacia atrás o hacia delante. Su cristalino es más denso que el nuestro y tiene un índice de refracción similar al del agua, lo que explica que puedan ver claramente bajo el agua mientras que, en nuestro caso, solo vemos de manera difusa. La forma esférica del cristalino y la colocación del ojo, casi siempre a los lados de la cabeza, garantizan que los peces tengan una vista omnidireccional extremadamente buena, pero falta la profundidad espacial, para lo que se necesitan campos de visión que se solapen. El campo de visión tridimensional de los peces está directamente frente a la nariz y es muy reducido, pero basta para hacer experimentos con ilusiones ópticas.



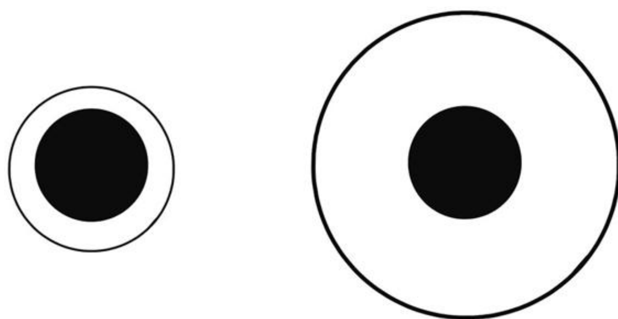
Corte transversal del ojo de un pez. Tiene una estructura similar a los ojos humanos, pero, a diferencia de los nuestros, en reposo, su foco está en la zona cercana, probablemente porque la vista a mayor distancia está limitada en el agua.

Los primeros estudios sobre el efecto de las ilusiones ópticas en peces se realizaron en los años 30, luego otra vez en los 60, y luego no pasó nada más durante 40 años. Quizás no se prestó atención a los peces durante tanto tiempo porque se los consideraba poco inteligentes y

movidos por el instinto, dado que no tienen corteza cerebral. Sin embargo, esta opinión cambió en el siglo XXI y, por fin, los peces pudieron volver a hacer sus pinitos con las ilusiones ópticas. Se hicieron estudios con distintas especies de peces de agua dulce y salada para comprobar su reacción a las ilusiones. Ya conoceréis la mayoría de esas ilusiones, así que podéis poneros a prueba.

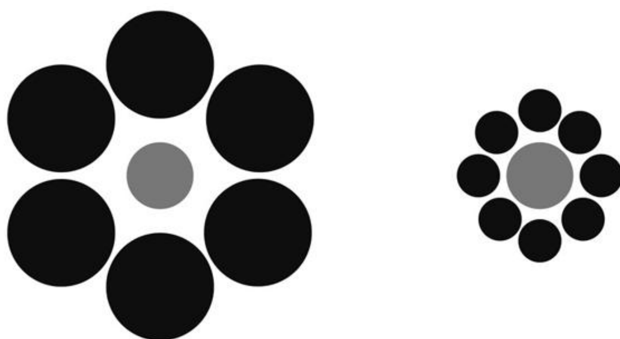
Empecemos con una de las llamadas ilusiones ópticas geométricas:

¿Qué círculo negro es más grande: A o B?



Ilusión de Delbœuf

En la siguiente imagen, ¿qué círculo es más grande, A o B?

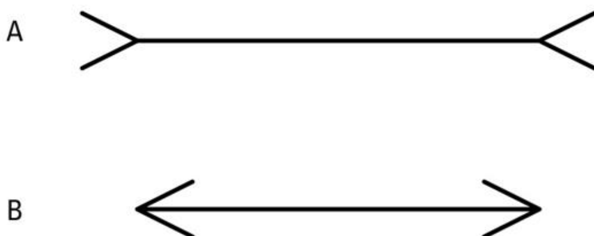


Ilusión de Ebbinghaus

En las ilusiones ópticas geométricas, el observador percibe las figuras de manera distinta a como son realmente. En la primera imagen, el círculo A parece más grande y en la segunda, el círculo B. En realidad, los círculos son idénticos, pero somos víctimas de una ilusión óptica. Casi todas las personas caen en esta ilusión. Una teoría, llamada el efecto del contexto, supone que no podemos percibir los objetos, los círculos en este caso, sin los círculos adyacentes y los utilizamos automáticamente para estimar el tamaño. Es decir, como los círculos

negros de la imagen A son tan grandes, el círculo gris parece más pequeño en comparación, mientras que en la B son más pequeños, haciendo que el gris parezca más grande. Así, tenemos la impresión de que los círculos grises son de distinto tamaño cuando, en realidad, son iguales.

Este efecto también puede aplicarse a la siguiente ilusión: ¿qué línea es más larga, A o B?



Ilusión de Müller-Lyer

Aunque A parece claramente más larga, la respuesta a la pregunta es que ambas líneas son exactamente iguales. El efecto contexto postula que, inconscientemente, no podemos dejar de valorar el conjunto (en este caso, A y B juntas), y así, la línea que acaba en puntas de flecha sería más larga. Otra teoría afirma que percibimos de forma inconsciente las líneas como objetos espaciales debido a su disposición, por lo que la línea A se interpreta como más lejana y más larga.

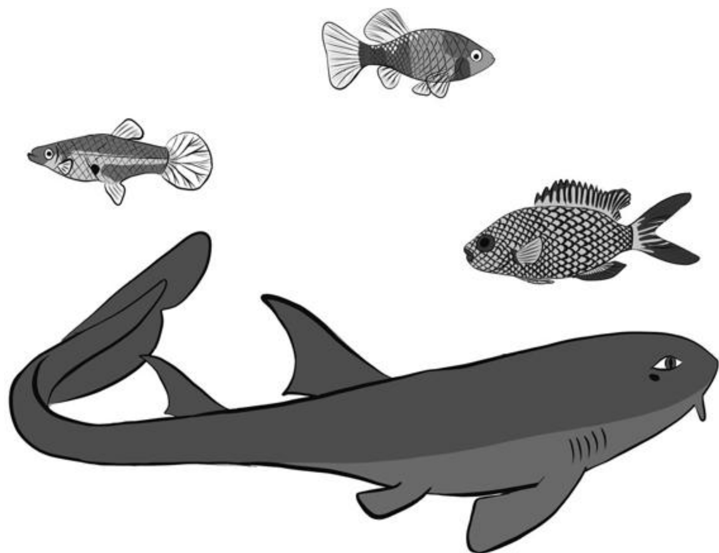
No está definitivamente claro por qué nos dejamos engañar así y, aunque estas ilusiones se crearan en el s. xix, se siguen investigando de forma activa. Lo que está claro es que no tienen que ver con nuestros ojos y que no podemos «abstraernos» de ellas. Aunque conozcamos la respuesta correcta, la impresión falsa permanece, es decir, de alguna manera la información se procesa incorrectamente en nuestro cerebro. Además, es algo que adquirimos a lo largo de la vida, porque curiosamente las ilusiones no funcionan con niños y niñas.

¿Y cómo funciona en los peces? ¿También se les puede engañar con estas ilusiones? Esta pregunta puede parecer un poco fuera de lugar de buenas a primeras, y puede que por eso no haya sido relevante para la ciencia, al menos, hasta ahora. Es evidente que esto tampoco es fácil de investigar, porque no se puede preguntar a los peces. Para resolver este problema de comunicación, se entrenó a los peces con un sistema clásico de recompensas: cuando tienen dos círculos de tamaño distinto para elegir y tocan el más grande con el hocico, reciben comida como premio. Cuando estuvieron bien entrenados, se les mostró la ilusión de Delbœuf y la de Ebbinghaus (las primeras imágenes) para ver qué círculo elegían, es decir, el círculo que vieran más grande, de acuerdo

con su entrenamiento. Se demostró que la castañuela (*Chromis chromis*), originalmente la única especie de pomacéntrido del Mediterráneo, percibió la ilusión óptica como las personas, mientras que la pintarroja colilarga gris (*Chiloscyllium griseum*), una especie de tiburón pequeño que habita en los suelos de aguas tropicales, reaccionó justo al revés; en estos peces, la ilusión parece funcionar al contrario. También se ha descubierto una reacción similar en otros animales, como las palomas. Una teoría es que estas son menos sensibles al contraste, y esto hace que los círculos adyacentes se conviertan en un solo círculo grande y se invierta la ilusión. Si volvemos a pensar en los tiburones que brillan, es posible que en realidad tengan problemas para percibir el contraste que no resalta con la fluorescencia; por supuesto, suponiendo que la pintarroja colilarga gris pertenezca a las especies de tiburones fluorescentes, algo que aún no se sabe. Además, tampoco tienen ningún patrón en la piel, solo son grises y es posible que utilicen otro sistema para reconocer a sus congéneres.

También se probó la ilusión de Müller-Lyer con la pintarroja colilarga gris, para lo que se entrenó a dos ejemplares con el fin de que eligieran la línea más larga entre dos puntos. Al final de la fase de entrenamiento, podían distinguir líneas con solo un centímetro de diferencia. Durante la prueba, se esperaba que los tiburones entrenados eligieran la línea con las flechas dispuestas hacia dentro, la que nos parece más larga a las personas. Sin embargo, esta ilusión tampoco funcionó con la pintarroja: no se dejaron engañar y siempre eligieron la línea correcta.

Otro estudio trabaja con goodeidos de cola roja (*Xenotoca eiseni*), peces ornamentales de agua dulce que a menudo viven en acuarios. En lugar de comida, estos peces reciben cercanía social como premio: se colocó a un individuo solo en una pecera conectada por tubos a otros acuarios, uno vacío y otro con congéneres. Uno de los túneles estaba marcado con una línea larga, el otro con una línea corta. Se entrenó a dos grupos de individuos, uno de los cuales siempre encontraba a sus congéneres en el túnel con la línea corta, mientras que el otro grupo tenía que elegir la línea larga para volver con los demás peces. Cuando los peces entrenados tuvieron que enfrentarse a la ilusión de Müller-Lyer, su elección del túnel demostró que percibían las líneas como si tuvieran tamaños distintos, igual que las personas. Otro estudio con los que son, probablemente, los peces de acuario más famosos del mundo, los guppys (*Poecilia reticulata*), obtuvo los mismos resultados.



De izquierda a derecha: guppy, goodeido de cola roja y castañuela. Debajo, la pintarroja colilarga gris.

En resumen, se demostró que los peces óseos investigados, es decir, los guppys, las castañuelas y los goodeidos, percibían la mayoría de las ilusiones ópticas geométricas de la misma manera que las personas. Los peces cartilaginosos, como la pintarroja, las veían de otra manera: o bien no percibían la ilusión en absoluto, o bien la percibían al revés. Lo interesante es que, en el caso de la ilusión de Delbœuf, la primera ilusión con círculos del capítulo, a los guppys les pasaba lo mismo que a nosotros.

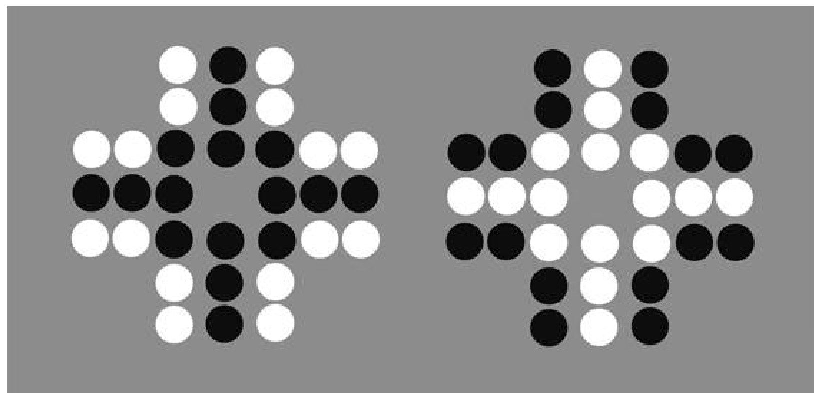
Además de las ilusiones geométricas, también se realizaron pruebas de ilusiones de percepción numéricas con peces. Estas ilusiones no consisten en números concretos (eso sería difícil de probar en animales sin enseñarles primero los números), sino en contar cantidades. Sí: ¡los peces pueden contar!

Cuando nos aburríamos en clase de matemáticas, una de las grandes preguntas que nos hacíamos era: «¿Para qué voy a necesitar esto?». Probablemente, ningún profesor o profesora contestó nunca que las capacidades de comprensión matemática son una ventaja evolutiva muy importante. Muchos animales tienen fundamentos matemáticos como contar, también los peces. Por ejemplo, pueden estimar qué porción de alimento es más grande entre dos, qué banco de peces tiene más individuos o dónde se concentran más hembras. Toda esa información puede ser importante para sobrevivir: un banco de peces mayor ofrece más seguridad que uno pequeño, merece más la pena nadar hacia donde hay alimento y, cuando se sabe dónde se juntan más hembras, la reproducción es más probable.

Los peces pueden contar tan bien como otros animales que solemos considerar más inteligentes, como los leones marinos o los perros. Pueden distinguir entre cuatro o cinco trozos de comida, pero, cuando los números son mayores, hacen estimaciones. Algo así pasa con las personas: sabemos exactamente con cuánta gente hemos comido, pero probablemente no podamos contestar a si en la última fiesta había 68 o 98 personas.

Como los peces tienen habilidades matemáticas, se pueden realizar experimentos de ilusiones numéricas, como la ilusión del solitario.

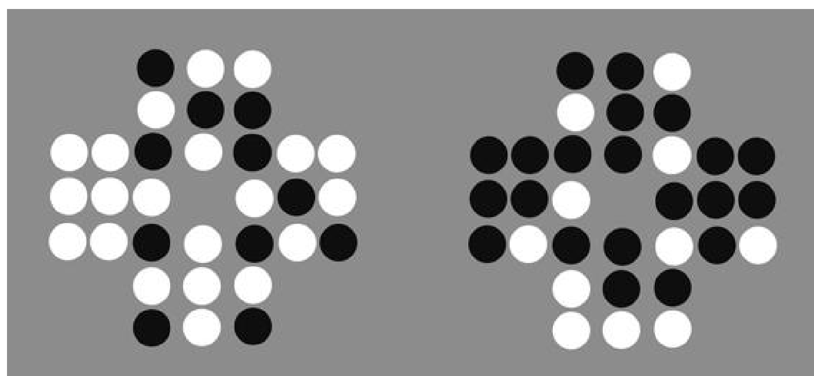
A primera vista, sin contar: ¿qué imagen tiene más puntos negros, la izquierda o la derecha?



Aquí, la izquierda parecer ser la respuesta, pero hay el mismo número en ambos lados, 16 puntos negros. Esta ilusión se explica, por una parte, con la ley de proximidad de la Gestalt, que afirma que el número de objetos que están próximos entre sí forman una figura, y, por otra, con la ley de la buena continuidad, que afirma que los objetos dispuestos en una línea o una curva se perciben como pertenecientes a un todo. El número de objetos que forma una figura se suele sobreestimar respecto a los objetos que forman unidades separadas más pequeñas. Apenas hay investigación sobre por qué y cómo percibimos las ilusiones numéricas. Lo que sí sabemos es que solemos sobreestimar los objetos en el centro de nuestra visión, mientras que los objetos periféricos, es decir, en los márgenes del campo visual, se subestiman. Esto podría jugar un papel importante en la ilusión del solitario.

Las ilusiones numéricas no se han probado tanto en animales, solo hay un estudio con peces, guppys en concreto. Se los entrenó para reconocer qué figura de solitario tenía más puntos negros mostrándoles dos figuras en las que había distintos puntos negros distribuidos aleatoriamente en la estructura. Se establecieron distintas fases de dificultad en las que la proporción entre puntos negros y blancos era cada vez menor: en la versión fácil se veían 11 puntos

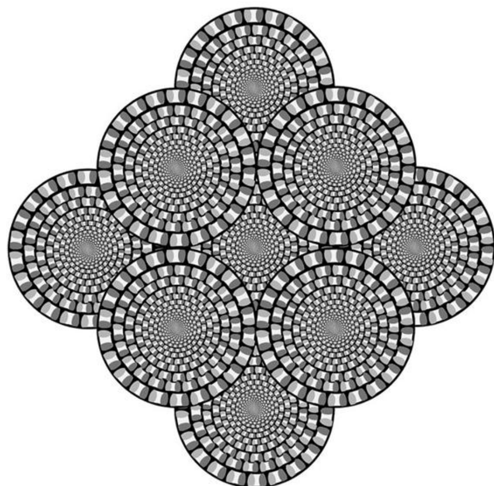
negros a la izquierda y 21 a la derecha; en la siguiente, 13 puntos blancos y 19 negros, y en la fase más difícil había 14 puntos blancos y 18 negros.



Ejemplo de dos figuras del entrenamiento de guppys. A la izquierda, once puntos negros; a la derecha, veintiuno.

Aquí se demostró que no todos los peces consiguen superar la fase más difícil. Después del entrenamiento, se enseñó a los peces la primera ilusión del solitario: ambas figuras tienen dieciséis puntos negros, pero, en una todos los puntos están en el centro y en la otra están distribuidos por los márgenes. La idea subyacente era que, si los peces perciben la ilusión como las personas, elegirían la figura en la que los puntos forman una figura en el centro, porque pensarían que tiene más puntos negros. No obstante, los resultados no fueron uniformes: solo una pequeña parte de los individuos, el 14%, cayó en esa ilusión y señaló la figura con los puntos en el centro. Estos peces eran los mismos que habían resuelto el nivel más difícil del entrenamiento. El resto de los peces no pareció reaccionar a la ilusión, quizás un poco abrumados por tantos puntos negros. Esto demostró, por un lado, que los guppys son capaces de contar, de lo contrario, el entrenamiento no habría dado resultados; por otro lado, ahora sabemos que también en los peces hay diferencias entre individuos, y parece que existe una especie de don para contar. Cuanto mejor es un pez en mates, más probable es que caiga en la ilusión.

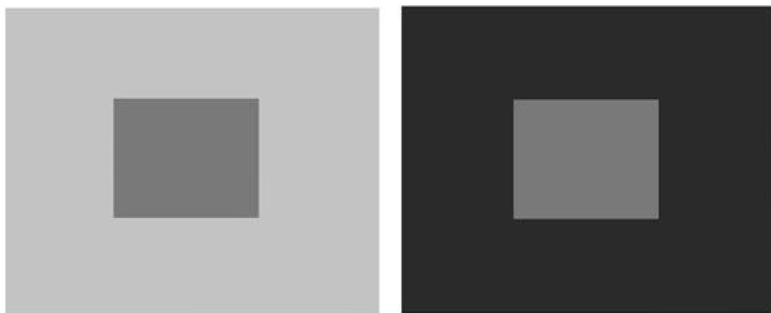
Se han probado más ilusiones de otros tipos en peces, por ejemplo, ilusiones de movimiento, en las que parece que un objeto se mueve aunque no sea así.



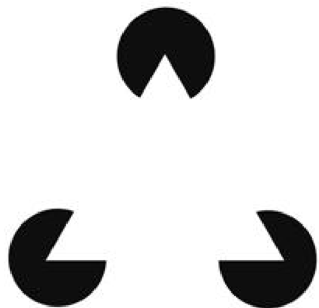
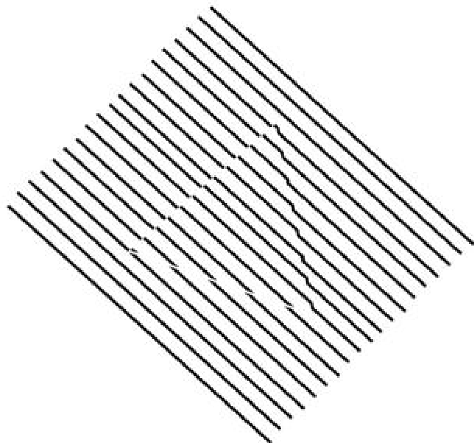
Los círculos que están fuera del foco, que se ven con el rabillo del ojo, parecen estar girando.

Los peces de agua dulce sometidos a esta prueba reaccionaron de forma muy parecida a la nuestra: la mayoría de ellos percibieron el movimiento, pero alrededor del 25% de ellos no vieron ningún movimiento. Esta distribución porcentual es muy similar a la obtenida en personas, ya que no todas perciben esta ilusión óptica.

Los peces de agua dulce y salada también reaccionaron como las personas a la ilusión de contraste simultáneo, que ya describió Aristóteles, según la cual dos objetos del mismo color se perciben más claros o más oscuros en función del fondo.



Tanto los peces de agua dulce como los de agua salada vieron los contornos aparentes, contornos que no existen técnicamente en los objetos pero que sí se perciben, del mismo modo que las personas. Únicamente los peces dorados parecen tener problemas para ello y no distinguen siempre el contorno.

En general, los estudios sobre ilusiones visuales con peces son relativamente nuevos y los motivos para realizarlos son de lo más diverso. Uno de ellos es que los peces óseos representan aproximadamente el 50 % de los vertebrados del planeta, lo que debería ser razón suficiente para interesarnos por ellos. Además, como ocupan muchos ecosistemas muy distintos, sus propiedades, habilidades y costumbres también son muy diferentes. No obstante, no siempre es fácil investigar a (y con) los peces; muchos peces de agua dulce, como los guppys o los peces cebra, se pueden mantener en acuarios sin mucho esfuerzo, pero los de agua salada requieren más esfuerzo. Es una pena, porque los peces de agua salada son la mayoría, con unas 20.000 especies. Los tiburones también podrían ser interesantes para la investigación, ya que son antiquísimos desde el punto de vista evolutivo, y podríamos aprender de ellos qué ilusiones ópticas existían hace millones de años y cuáles podrían suponer una ventaja evolutiva. Y quien no se interese por los peces por ser peces, se le podría decir que estos estudios también ayudan a entender mejor a las personas: examinamos organismos que consideramos menos complejos desde nuestra perspectiva e intentamos comprender primero lo sencillo para trasladarlo a lo más complejo. Aunque suene sorprendente, en lo que respecta a las ilusiones, parece que somos un poco peces.

Aun así, quedan muchas cosas por aclarar: en casi todos los estudios con personas mencionados aquí, se demostró que las ilusiones tenían que estar relacionadas con la corteza cerebral. Los estudios con peces, que no tienen corteza cerebral pero con quienes funcionan las ilusiones, demostraron que tiene que haber otras estructuras cerebrales implicadas. Lo interesante de las ilusiones ópticas es que los aspectos culturales también influyen en la percepción: las ilusiones geométricas no funcionan con personas de culturas cuya escritura y cuyo arte no tienen círculos ni líneas rectas, por ejemplo, el pueblo

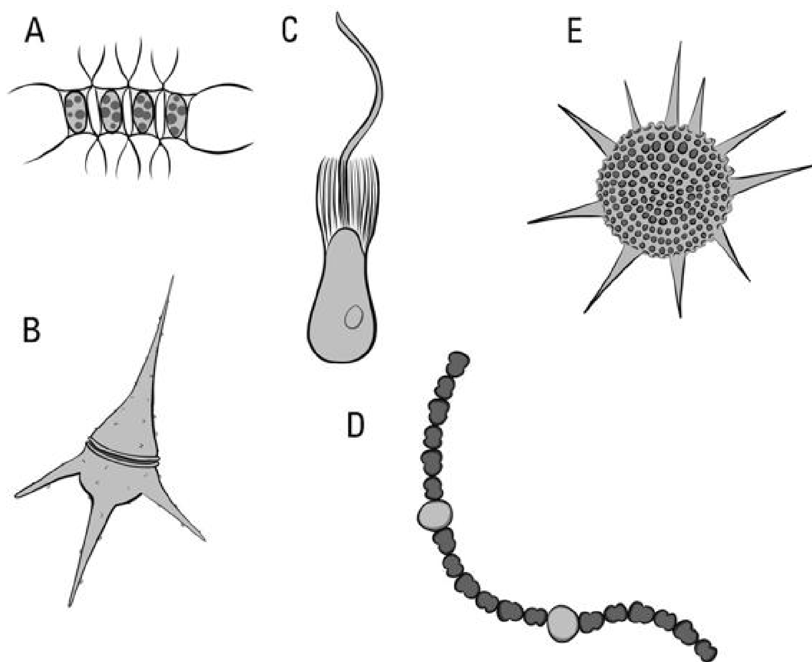
san, un grupo étnico del sur de África. Esto quiere decir que es necesario haber visto antes un círculo para poder equivocarse con esa ilusión. Es más fácil imaginarlo con la ilustración en blanco y negro *Mensaje de amor de los delfines*, de Sandro del Petre, en el que el artista crea una ilusión óptica jugando con las luces y las sombras: una mujer desnuda se arrodilla en el suelo, detrás de ella, un hombre le abraza las caderas, ella estira los brazos hacia arriba, sosteniendo suavemente la cabeza de su amante, que se inclina para besarle la cara. Al menos, eso es lo que ven los adultos. Los niños y niñas no ven a ninguna pareja, sino ocho delfines que nadan felizmente en el agua. Es decir, solo vemos lo que nos es familiar o lo que conocemos.

¿Será así también en los peces? ¿Es posible que los peces dorados no reconozcan los triángulos porque no existen en su mundo y, por tanto, no ven sus contornos?

Las ilusiones ópticas han ayudado mucho a la investigación neurológica y fisiológica. Todos los días confiamos en nuestros ojos y en nuestra interpretación de lo que vemos, y esto nos permite, por ejemplo, estimar nuestra velocidad y las distancias y frenar antes de estrellarnos contra una pared. Podemos coordinar los movimientos para coger un libro de una estantería sin equivocarnos, o lanzar una pelota a un objetivo. Podemos fiarnos de nuestros sentidos, excepto en las ilusiones, por eso nos fascinan, y por eso precisamente son un instrumento perfecto para investigar los procesos de los órganos sensoriales y de cerebro. A pesar de siglos de investigación, conocer cómo funcionan exactamente sigue siendo un misterio, tanto en las personas como en los peces. Desde principios del milenio, solo unos pocos estudios se han dedicado a las ilusiones ópticas de percepción en los peces, de modo que aún sabemos muy poco de cómo perciben estos el mundo con sus ojos. También significa que quedan muchas preguntas por responder y muchas cosas nuevas por descubrir.

Desde 2020, los virus están en boca de todo el mundo, literalmente: la pandemia del coronavirus ha puesto nuestra vida cotidiana patas arriba. En el mar, los virus tienen un papel muy importante, no como patógenos sino como factor de evolución y proveedores de nutrientes en el microcosmos del mar. Entre los microorganismos hay un gran número de seres vivos, y lo que los une es, como su nombre indica, el tamaño microscópico. Por un lado, están las procariotas, es decir, bacterias y arqueas; por otro, los organismos eucariotas unicelulares, como algas, hongos, ciliados, radiolarios y los dinoflagelados. Y, por supuesto, no podemos olvidar el grupo de los virus.

Los virus se encuentran desde la superficie del agua hasta las aguas profundas, e incluso en los sedimentos. En realidad, son el «ser vivo» más común en el océano, con hasta cien millones de virus por mililitro. Si se alinearan todos los virus del océano uno tras otro, formarían un puente tan grande que llegaría a las siguientes sesenta galaxias.

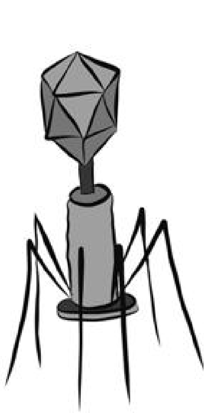
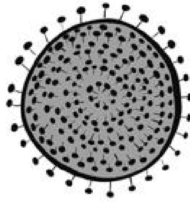
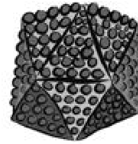
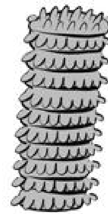


A) Las diatomeas son en realidad algas unicelulares, pero pueden juntarse en grupos y cadenas. B) Los dinoflagelados pueden realizar la fotosíntesis o ser depredadores en función de la especie. C) Los coanoflagelados comen bacterias que casi pueden meterse en la boca con el flagelo. D) Las cianobacterias también se conocen como algas azules porque realizan la fotosíntesis, al igual

que las algas. E) Los radiolarios tienen un exoesqueleto con agujas en forma de rayos hechas de dióxido de silicio. Se alimentan de partículas orgánicas que se encuentran en el agua.

Llamarlos «seres vivos» es polémico. La virología tiene opiniones distintas; aquí, lo primero es definir qué se entiende por «vida», porque, aunque ya los antiguos griegos se quebraron la cabeza, hoy en día sigue sin haber una definición única de lo que significa exactamente la vida. Si nos atenemos a una definición escolar clásica y a la capacidad para moverse, respirar, reaccionar a estímulos, crecer, reproducirse, alimentarse y excretar, los virus no encajan. A grandes rasgos, estos no son más que bolsas de proteínas con algo de ADN. Los virus, de entre 25 y 300 nanómetros, son tan pequeños que solo se pueden ver con microscopios electrónicos. Su genoma, de entre 4.000 y 630.000 pares de bases (las personas tenemos tres mil millones de pares de bases) también es mínimo. No se mueven activamente ni reaccionan a estímulos, no necesitan alimento y, por lo tanto, tampoco excretan. Solo hacen una cosa, que es casi su único objetivo en la vida: reproducirse. No obstante, no pueden hacerlo solos, necesitan una célula huésped que haga el trabajo por ellos, de forma involuntaria, eso sí. Considerando que los virus son parásitos totalmente dependientes de sus huéspedes y no tienen nada «vivo» en sí mismos, a menudo no se los considera. No obstante, hay investigadores e investigadoras que los consideran una especie de frontera entre la vida orgánica y las sustancias químicas, o, incluso, una fase previa a la vida. Se definan como se definan, los virus están extraordinariamente extendidos en nuestro planeta y no solo son muy diversos genéticamente, sino que también existen muchísimas formas y variedades: virus de ADN de doble cadena, virus de ADN de cadena simple, virus de ARN de doble cadena, virus de ARN de cadena simple, virus con envoltura, virus sin envoltura, virus gigantes, virus que atacan a eucariotas, virus que atacan a arqueas, virus que atacan a bacterias e, incluso, virus que atacan a otros virus.

Dado que el mundo microbiano de los mares se compone principalmente de bacterias, los virus que atacan a las bacterias, llamados bacteriófagos, o simplemente fagos, son especialmente importantes. El fago estándar tiene una envoltura de proteínas de estructura muy simple, con el ADN dentro. Cuando se da la casualidad de que acabe en una célula bacteriana (él mismo no se puede mover activamente), inyecta su ADN en la bacteria como con una jeringuilla. A continuación, hay dos opciones de cómo seguirá la infección.

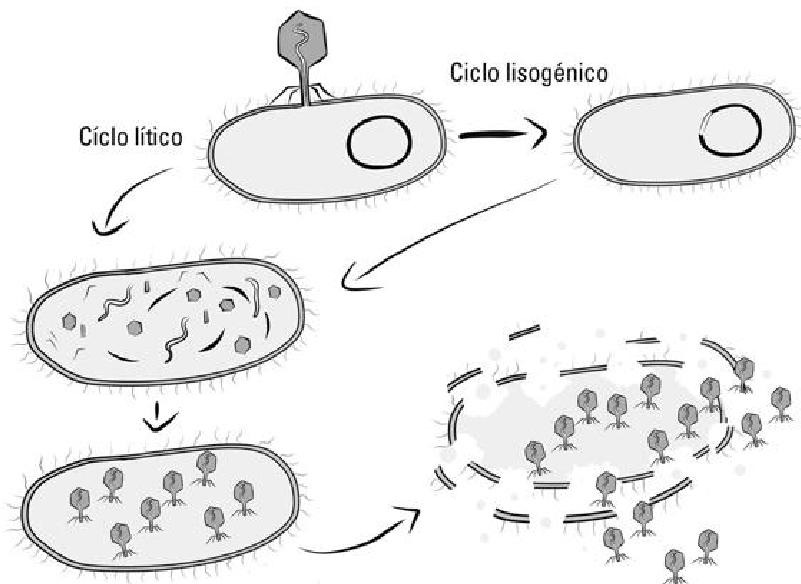





Los virus también son muy distintos
en cuanto a su aspecto.

La primera opción es el llamado ciclo lítico. El virus captura la célula, por decirlo así, y la obliga a crear muchos virus nuevos. Luego, la célula explota y los nuevos virus se distribuyen por el entorno, con la esperanza de encontrar al siguiente huésped antes de que se los coman o la luz solar los destruya.

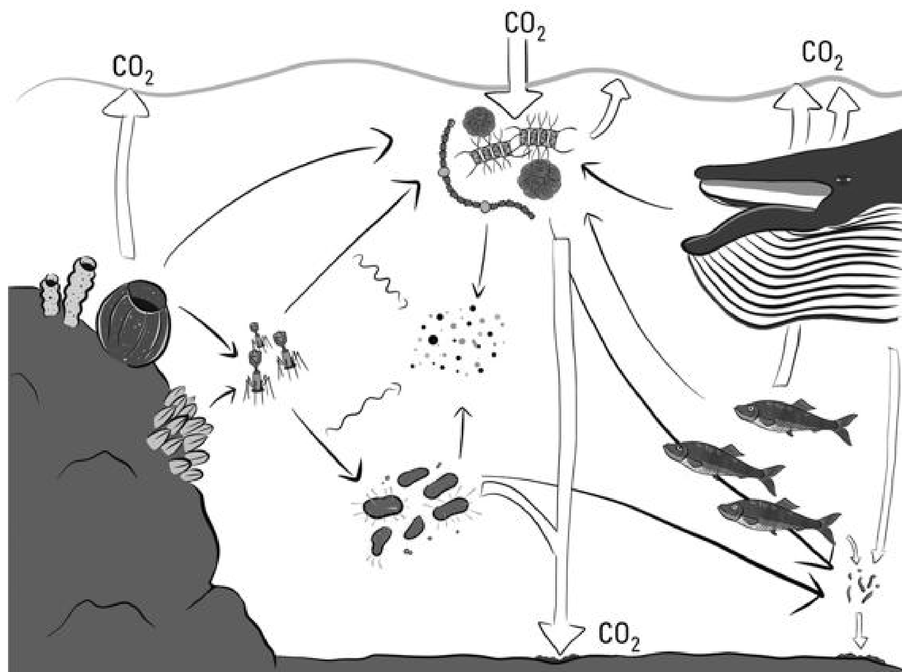
La segunda estrategia es el ciclo lisogénico: los virus introducen su ADN como si fuera contrabando en la célula huésped, este se queda allí y se vuelve inactivo; este ADN integrado en la célula huésped se denomina prófago o provirus. De esta manera, el virus se copia cada vez que la célula se divide, con lo cual el virus también se reproduce. Los factores externos, como la luz ultravioleta, pueden despertar al virus de su reposo y este puede empezar a reproducirse activamente como en el ciclo lítico.

Independientemente del ciclo, el final es la muerte de la célula, lo que no es nada bueno para la célula afectada. Sin embargo, si se observa la imagen completa, los virus son importantísimos para el ecosistema del mar, ya que su comportamiento influye en los circuitos biogeoquímicos que se producen en el mar.



Representación esquemática del ciclo lítico
y el lisogénico de reproducción de los virus.

Los circuitos biogeoquímicos son los procesos en los que las sustancias químicas, como el carbono, son sintetizadas y utilizadas por los seres vivos. Algunos elementos químicos importantes en el mar son el carbono, el nitrógeno, el fósforo y los fosfatos o el azufre. El circuito del carbono tiene un papel fundamental para nuestro planeta en estos tiempos de cambio climático. Los microorganismos fotosintéticos, como algas y bacterias, absorben carbono en forma de CO_2 y lo transforman en azúcar; otros seres vivos se comen estos organismos, y así es como el CO_2 se incorpora a la cadena trófica, o bien los organismos se hunden hasta el fondo marino, y forman sedimentos. De esta manera, el CO_2 de las células muertas no vuelve a la atmósfera. En este circuito, el llamado *viral shunt* desempeña un papel importante: cuando los virus se introducen en estos microorganismos y sus células explotan, los componentes celulares se distribuyen por el agua, con lo que ya no son alimento para organismos más grandes, como el krill, y tampoco se hunden en aguas profundas. Aun así, estos componentes celulares son un alimento fantástico para las llamadas bacterias heterótrofas, que son dependientes de la energía orgánica. Es como comer galletas: las migas del plato no nos interesan, pero son todo un manjar para las hormigas. De este modo, la presencia de virus favorece el crecimiento de bacterias heterótrofas. Para aclarar aún más la influencia que tienen los virus: se estima que son los responsables de proporcionar 145.000 toneladas de carbono al año solo en los océanos tropicales y subtropicales.



Sección del ciclo del carbono (flechas blancas) y red de alimentación (flechas negras) en el mar. Los virus son un componente de la bomba de carbono marina, destruyen microorganismos sacándolos de la cadena trófica. Al mismo tiempo, también son parte de la cadena trófica, ya que la explosión de las células proporciona alimento a las bacterias y, además, los propios virus sirven de alimento para filtradores, como bivalvos o esponjas.

Según la hipótesis Matar al ganador o *Kill the winner*, las infecciones también contribuyen a mantener la diversidad en las comunidades microbianas. Cuando las condiciones son especialmente buenas para una especie de microbio, esta domina el entorno y subyuga al resto de especies, pero este éxito y el crecimiento de su población se lo ponen fácil también a los virus especializados en dicha especie, que pueden mantener a raya esa explosión demográfica. Esto puede no parecer gran cosa a primera vista, pero el crecimiento de algas unicelulares, por ejemplo, puede ser un problema enorme para los habitantes del mar, la acuicultura y las personas. Cuando se producen crecimientos extremos de algas debido a un gran aporte de nutrientes, estas pueden llegar a ocupar muchos kilómetros cuadrados y teñir el agua; por si fuera poco, algunas de esas algas y cianobacterias unicelulares expulsan sustancias venenosas, y contribuyen a la muerte masiva de seres vivos marítimos e incluso de personas si comen pescado contaminado. La más conocida es la «marea roja» venenosa que tiñe el agua de un rojo intenso debido al incontable número de dinoflagelados *Karenia brevis*. La dramática muerte masiva de animales marinos cerca de la península rusa de Kamchatka en 2020 también se

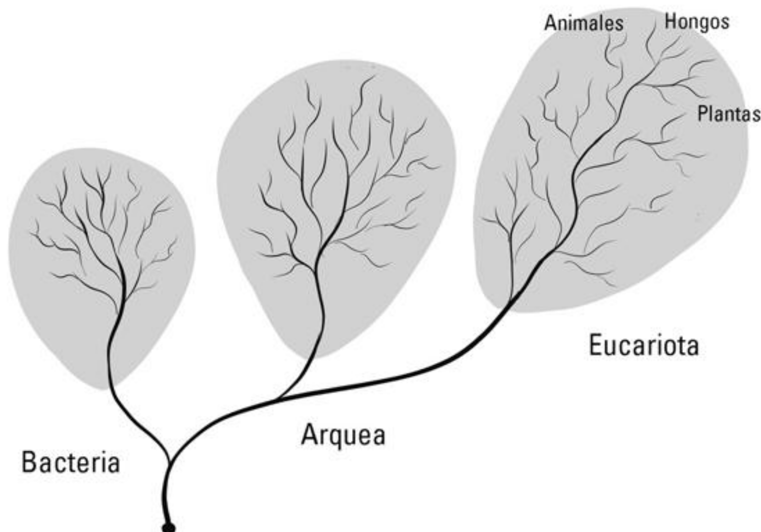
debió a un crecimiento incontrolado de algas. La espuma que suele encontrarse en las costas del mar del Norte y el Báltico también es el resultado de este crecimiento de algas. Por eso son necesarios los virus, para controlar ese tipo de acontecimientos masivos.

Los virus son muy importantes también para la evolución de muchos organismos marinos. El genoma, es decir, la información genética de los seres vivos, se suele transferir a su descendencia; es lo que se conoce como transferencia genética vertical. La transferencia genética horizontal es el intercambio de genes entre dos individuos sin contacto sexual, es decir, que no son los descendientes quienes tienen nuevas características genéticas, sino que los propios individuos se modifican genéticamente mediante la transferencia horizontal. Esta función se conoce hace ya tiempo en las bacterias y se denomina conjugación, en la que las células se intercambian anillos de ADN, conocidos como plásmidos. También pueden incorporar tramos de ADN que flotan sueltos; es lo que se conoce como transformación. De este modo, una cepa inofensiva de bacterias puede convertirse en patógena o volverse resistente a los antibióticos. Los virus son fundamentales en otra forma de transferencia genética: la transducción, que se da en eucariotas, además de en bacterias, y que se conoce desde principios de este siglo. Cuando los virus se han introducido en el genoma de una célula y la ponen a producir nuevas copias del virus, es posible que algunas partes del ADN del huésped se enganchen al ADN del virus y se copien con él. De este modo, los nuevos virus llevan esa parte del ADN del huésped al siguiente huésped, y esto es lo que hace que los virus sean un factor importante en el desarrollo evolutivo de los microorganismos. Un ejemplo conocido de transducción es el de las cianobacterias de los géneros *Synechococcus* y *Prochlorococcus*. Las cianobacterias también se denominan de manera equivocada algas azules porque algunas especies tienen un color azul verde y porque realizan la fotosíntesis, como las algas, aunque no son algas sino bacterias. En conjunto, estos dos géneros de cianobacterias son responsables del 25% de toda la fotosíntesis del planeta. Y es normal, ya que hay miles de millones de ellas en el mar. Al examinar más de cerca los cianófagos, es decir, virus especializados en cianobacterias, se demostró que llevan genes de fotosíntesis, lo cual es poco habitual. Se asumía que los fagos solo albergaban genes que necesitaban para reproducirse; ¿por qué iban a tener genes de fotosíntesis? Por supuesto, para los fagos supone una ventaja tener un par de genes que contribuyan a que la célula huésped genere más energía. De hecho, se descubrieron genes que permiten a la célula huésped vivir en distintas condiciones lumínicas, ampliando así su hábitat a capas más profundas. Cuando a la célula huésped le va bien y se multiplica con frecuencia, el virus también se multiplica y, cuando el virus pasa al

ciclo lítico, prácticamente todo en la célula se apaga para dedicarse únicamente a producir virus. Esta producción necesita energía, claro, por lo que es necesario mantener la fotosíntesis funcionando; para eso es genial haber incluido un par de genes que mejoren la fotosíntesis. De este modo, no solo el virus tiene ventaja. Se especula con que las poblaciones de fagos actúan como reservorio de genes para sus huéspedes, permitiéndoles intercambiar genes entre distintas especies.

La bacteria SAR11, también conocida como *Pelagibacter ubique*, cuya población estimada es de $2,4 \times 10^{28}$ células, y es el ser vivo más abundante en el planeta, también debe su éxito a un virus. La SAR11 se encuentra en todas partes en el mar y se adapta a las condiciones ambientales más distintas, aunque su genoma sea muy pequeño. El genoma incluye prófagos muy a menudo, aunque son casi inofensivos para las bacterias porque su ciclo lítico solo se activa en un 30% de los casos. Se presupone que la SAR11 y sus fagos han desarrollado una especie de simbiosis en la que el fago solo mata las bacterias necesarias para mantener la población estable y, por su parte, ayuda a la bacteria a aumentar su diversidad genética a través de la transferencia genética horizontal, ampliando su hábitat. En resumen, una situación más *piggyback the winner* («súbete a la ola del ganador») que de matar al ganador.

Resulta interesante que la transferencia genética horizontal no solo se da entre distintas especies o géneros, parece que también es posible el intercambio genético entre distintos dominios, es decir, entre bacterias, arqueas y eucariotas. Este intercambio genético abre a los organismos nuevas posibilidades de protección, ampliación del espectro de alimentación, ocupación de nuevos hábitats y adaptación a condiciones ambientales extremas. Las ascidias tienen una habilidad única en el reino animal, la de crear celulosa como hacen las plantas y utilizarla como exoesqueleto protector. Algunas diatomeas tienen genes bacterianos para captar mejor el hierro, uno de los nutrientes más escasos en el mundo marino. El alga unicelular *Phaeocystis anctartica* puede soportar el frío antártico con ayuda de genes bacterianos que producen una especie de anticongelante. El alga roja *Galdieria sulphuraria* puede soportar entornos extremadamente calientes y ácidos gracias a la transferencia genética horizontal. En todos estos ejemplos, se asume que estas capacidades se han adquirido a través de transferencia genética entre dominios, aunque aún no está claro si esa transferencia genética se debe a virus o a otras opciones de transferencia de genes. Los nuevos descubrimientos, como el de un virus gigante en 2019 que aporta genes que hacen que los coanoflagelados (eucariotas unicelulares depredadoras) adquieran la capacidad de realizar la fotosíntesis, refuerzan esta teoría.



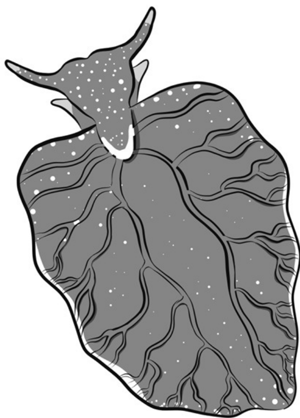
El árbol genealógico de la vida se compone de tres dominios: las bacterias, las arqueas y las eucariotas. Las diferencias típicas entre los dominios son, por ejemplo, que las eucariotas tienen orgánulos y núcleo celular. Las bacterias y las arqueas se diferencian en su membrana celular y en su metabolismo. El grado de parentesco en el árbol genealógico se basa en lo similar que es el ARN (ácido ribonucleico) ribosómico, que se encuentra en los tres dominios. Originalmente, se suponía que no era posible el intercambio de genes entre dominios.

Además de en los microorganismos, los virus también desempeñan un rol en animales más complejos, y no solo como patógenos. Un ejemplo interesante es la babosa marina *Elysia chlorotica,* que funciona con energía solar. La pequeña babosa alcanza el centímetro de largo y su espalda se ha convertido en una especie de capa que recuerda la hoja de un tilo, con un color verde esmeralda brillante y una apariencia aterciopelada. Lo de «funcionar con energía solar» se debe a la capacidad que tiene de alimentarse de luz solar, como hacen las algas y las plantas. Esto es muy destacable, ya que los animales no suelen tener la capacidad de aprovechar la luz del sol para alimentarse, y la babosa tampoco puede hacerlo sola. En lugar de esto, roba cloroplastos de las algas que come para poder realizar la fotosíntesis por sí misma. Los cloroplastos son orgánulos en las células de plantas y algas en los que se produce la fotosíntesis y, como todos los orgánulos que se autorreproducen, tienen un pequeño genoma. La babosa solo come algas de una especie concreta, *Vaucheria litorea*, no parece poder usar los cloroplastos de otras especies de algas. Las células de las algas se digieren en el estómago de la babosa, pero los cloroplastos se absorben en las células y se almacenan en las células del tracto digestivo, distribuido a lo largo de la espalda con forma de hoja, esa especie de toldo ofrece a los cloroplastos unas condiciones de

funcionamiento perfectas. Cómo consigue digerir las algas e incorporar los cloroplastos sin dañarlos es todo un misterio y tampoco está claro cómo puede la babosa realizar la fotosíntesis durante meses, o hasta un año, sin tener que comer nada, porque para eso se necesitan algo más que cloroplastos. Aunque estos tengan sus propios genes, hacen falta otros genes del ADN de las algas para que la fotosíntesis pueda llevarse a cabo. Al examinar la babosa, se puede comprobar que su genoma tiene exactamente esa información genética de las plantas. ¿De dónde la ha sacado?

Aquí vuelve a aparecer la transferencia genética horizontal. Se presupone que los virus han ayudado a introducir los genes de las algas en el genoma de la babosa. Además, el ciclo de vida de la babosa también parece estar determinado por los virus. La babosa muere de repente después de poner los huevos. Dado que, incluso en el aislamiento de un laboratorio, poco antes de su muerte se encuentran en la babosa una mayor cantidad de partículas similares a los virus, se asume que estos se encuentran en el genoma y que inducen la muerte de la babosa. Así, los virus no solo proporcionan a la babosa una fantástica propiedad nueva, también determinan la duración de su vida.

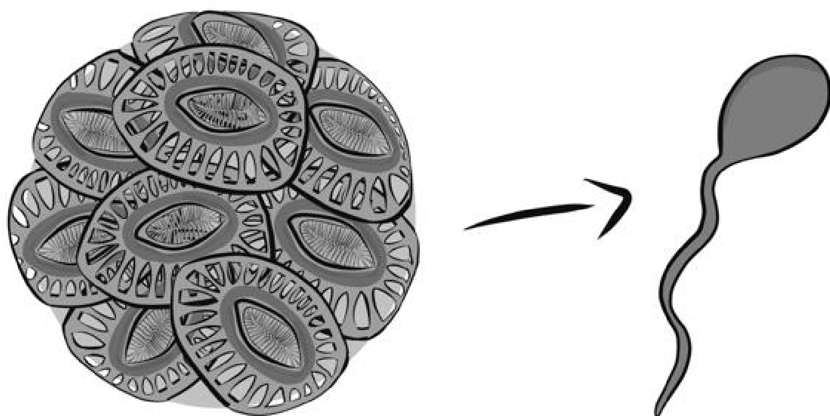
No obstante, está hipótesis es controvertida porque, en los últimos años, se han encontrados pruebas tanto a favor como en contra. Esto lleva a otra reflexión: que la babosa no produzca por sí misma las proteínas de la fotosíntesis, sino que las adquiera de las células digeridas de las algas. Unas proteínas especiales de protección le permitirían asegurar esta función durante varios meses. Además, desde 2019, las babosas marinas ya no son el único animal que puede robar cloroplastos. Se han descubierto dos especies de gusanos planos (*Baicalellia solaris* y *Pogaina paranygulgus*) que realizan la fotosíntesis con los cloroplastos de las diatomeas. A través de ellos quizás podamos obtener una perspectiva mejor de cómo se mantiene exactamente la fotosíntesis y si los virus son fundamentales para ello.



La babosa marina fotosintética *Elysia chlorotica* se encuentra en marismas salinas de la costa este de Estados Unidos y Canadá, por lo menos si se tiene suerte y buen ojo, porque es muy rara, muy pequeña y tiene muy buen camuflaje, algo que no facilita la investigación.

Aunque cada segundo haya 10^{23} (eso es un uno con veintitrés ceros) células de fitoplancton y bacterias infectadas con virus y parezca que los virus sean invencibles en el mar, las bacterias no están a merced de los virus sin más, también tienen posibilidades de protegerse. Para ello, los huéspedes desarrollan ciertos mecanismos para defenderse de intrusos, mientras que los virus, por su parte, desarrollan maneras de saltarse esos mecanismos. Este toma y daca también se conoce como hipótesis de la Reina Roja, llamada así por *Alicia en el país de las maravillas*, donde la Reina Roja explica: «Aquí tienes que correr lo más rápido que puedas para quedarte donde estás». El alga *Emiliania huxleyi* es un bello ejemplo de la competencia entre virus y huéspedes. El alga unicelular vive en las capas superiores del agua como parte del plancton y se encuentra en casi todas las regiones; al igual que las cianobacterias, es un engranaje importante en el sistema marino de bombeo de carbono. Son características sus placas de calcita, que recuerdan a un grupo de romanos temerosos defendiéndose con sus escudos de Astérix y Obélix. Algunas veces, estas algas crecen en tal cantidad que su armadura blanca da al agua un tono azul lechoso que se puede reconocer incluso por satélite. Estas floraciones duran poco y se deshacen, probablemente por una alta actividad viral, porque su armadura no las protege y, aunque han desarrollado un mecanismo genético de autodestrucción para evitar la expansión de los virus, estos encontraron hace tiempo una manera de evitarlo. No obstante, *Emiliania huxleyi* guarda otro as en la manga: tiene dos estadios de vida, uno en el que tiene las placas de calcita y un estadio sexual en el que se deshace de la armadura y puede moverse. En este estadio, el

virus no puede engancharse y el alga puede asegurar la reproducción.



Los dos estadios de vida del alga *Emiliania huxleyi*.

Las bacterias y arqueas también tienen un mecanismo de protección contra virus: el sistema CRISPR/Cas, que se ha hecho muy famoso en los últimos años. El sistema reconoce ADN extraño que ha penetrado en la célula y lo corta con una enzima. Para poder reaccionar más rápidamente a una nueva infección, una pequeña parte del ADN del virus se incorpora al genoma de la bacteria. Esta «foto genética del sospechoso » tiene la ventaja de poder transmitirse a la descendencia. El sistema CRISPR/Cas obtuvo mucha atención cuando científicos y científicas lograron usarlo para desarrollar una nueva técnica de manipulación genética. Estas tijeras genéticas, como se llaman a menudo, hacen que sea mucho más rápido y sencillo desactivar, insertar o cortar con precisión genes en seres vivos. Puede parecer sencillo, pero fue un descubrimiento revolucionario para la biotecnología, la revista *Science* consideró este método el descubrimiento del año, y en 2020 supuso el Premio Nobel de Química para Emmanuelle Charpentier y Jennifer Doudna.

Los virus también tienen enemigos, y no son pocos; pueden ser incluso su propia perdición, ya que hay virus que infectan a otros virus. Conocemos la existencia de los llamados virus gigantes desde 2003, cuando se descubrió que la bacteria *Bradfordcoccus*, que infecta a las amebas, no es una bacteria sino un virus gigante. Desde entonces, se han descubierto muchos de estos parásitos gigantes que pueden verse incluso con un microscopio óptico, y no son una anomalía extraña en el mundo de los virus. Los virus gigantes no solo son gigantes por su envoltura, también tienen mucho ADN; mientras que los virus estándar se conforman con unos diez genes de media, los virus gigantes tienen cientos de genes. Puede que el tamaño conlleve la vulnerabilidad, porque hay virus diminutos, los virófagos, que se han especializado en engañar a sus hermanos mayores. Se colocan en

la envoltura de los virus gigantes y se van con ellos en busca de una célula huésped. Cuando los virus gigantes capturan la célula y la obligan a crear nuevos virus gigantes, los virófagos se apoderan de esa fábrica de virus para reproducirse. El resultado: muchos diminutos virófagos nuevos y muy pocos virus gigantes.

Los virus también pueden ser presa de animales grandes. Sirven de alimento para muchos animales filtradores, es decir, animales que filtran el agua y digieren las partículas atrapadas, como bacterias, organismos unicelulares o virus. Algunos ejemplos de animales filtradores son las anémonas, los crustáceos, las ascidias, los balánidos, los copépodos, los moluscos o las esponjas. Precisamente, a las esponjas les encantan los virus y son extremadamente eficientes a la hora de filtrarlos del agua. En regiones con una gran densidad de esponjas, como los arrecifes de coral y en aguas frías con fondos rocosos, pueden encontrarse hasta 1.400 esponjas por metro cuadrado y, allí, probablemente las esponjas ejercen una gran influencia en el contenido de virus del agua. Además, las esponjas no solo comen virus, también pueden luchar contra ellos con moléculas antivirales: la molécula Ara-A sirvió de modelo para desarrollar medicamentos contra enfermedades virales. También el *Remdesivir*, desarrollado originalmente contra el ébola y en el que se pusieron muchas esperanzas para el tratamiento de la COVID-19, se basa en moléculas antivirales de esponjas. ¿Quién iba a pensar que Bob Esponja sería el arma secreta contra los virus? La importancia de los animales filtradores en la concentración de virus en el mar no se conoce desde hace mucho, por lo que no se sabe cuánto influye de manera indirecta en la circulación de sustancias en los mares. Lo que sí está claro es que los virus se acumulan en los animales filtradores antes de que los digieran por completo. Por desgracia, eso es un problema para las personas, porque muchos virus especializados en personas que llegan al mar en las aguas residuales se concentran en los animales y, aunque apenas comamos esponjas, otros animales como los mejillones y las ostras sí son parte de muchos menús. Precisamente, la hepatitis A se encuentra a menudo en mariscos del Mediterráneo y solo el calor prolongado por encima de 100 °C o la vacunación contra la hepatitis A puede proteger de una infección.

El perfeccionamiento continuo de la secuenciación de genes para leer el ADN ha permitido conocer mucho sobre el mundo de los virus en este milenio. Aun así, todavía nos sorprende su diversidad; se ha descubierto que los desiertos helados del Ártico y la Antártida son un paraíso para los virus. No hay ningún otro lugar en la Tierra con tanta variedad viral como las dos regiones polares, lo cual es extremadamente llamativo, porque la diversidad de especies se reduce a medida que aumenta la distancia al ecuador, lo que explica que el

Ártico y la Antártida sean regiones muy pobres en especies por sus duras condiciones ambientales. Dado que la mayoría de los mares y el hielo marino están poblados principalmente por microorganismos y no hay grandes depredadores, es probable que los virus desempeñen un papel aún más importante que en el mar. Los nuevos descubrimientos muestran que, al igual que en los desiertos helados, los virus también influyen de forma decisiva en las comunidades microbianas de aguas profundas, donde también faltan depredadores. Aunque siempre se estén descubriendo virus nuevos, la pregunta más difícil, «¿quién es el huésped?», sigue sin respuesta, y sin respuesta no podemos comprender del todo el papel de los virus en su ecosistema. Desgraciadamente, aún no se han podido cultivar bacterias marinas en laboratorio, apenas el 1%, y esto también se aplica a los virus, por eso es tan difícil investigar virus marinos. No obstante, los avances de nuevos métodos y la combinación de estos, como la metagenómica (la secuenciación de todo el ADN de una muestra de agua) con la metatranscriptómica (la secuenciación de los genes activados en la muestra) nos ayudarán en los próximos años a aprender más sobre la influencia de los virus en los circuitos globales de sustancias y en la historia evolutiva de nuestro planeta.

Epílogo:
Lo que aún se esconde ahí fuera

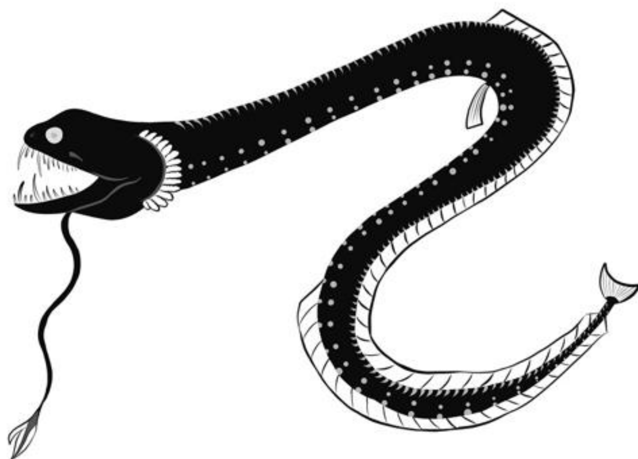
Casi hemos llegado al final de nuestra expedición, pero a las ciencias marinas aún les queda mucho camino por delante. ¡Por suerte! En los próximos años y décadas veremos nuevos descubrimientos, teorías y seres vivos impresionantes. Solo en 2020 se realizaron muchos hallazgos sorprendentes. Un enorme trozo libre de arrecife de coral en el extremo norte de la Gran Barrera de Coral sorprendió a los científicos de Australia, la montaña de coral mide 500 metros de alto y su base se extiende a lo largo de 1,5 kilómetros. Quinientos metros es casi la altura del Shanghai World Financial Center, también conocido como el Abrebotellas por su peculiar arquitectura. Quien no conozca el Abrebotellas, puede imaginarse la Torre de Cristal de Madrid, pero el doble de alta. Es impresionante. Aunque sabemos que apenas hemos investigado el fondo marino, no deja de llamar la atención que no hayamos descubierto estructuras tan enormes antes. Incluso en aguas bien conocidas, como las del Adriático, se ha descubierto un arrecife de coral desconocido hasta ahora. Frente a la ciudad de Monopoli, en Apulia, al principio del talón de la bota de Italia, se encontró un arrecife de 2,5 kilómetros de largo a una profundidad de entre 30 y 50 metros. Que haya corales en el Mediterráneo no es algo nuevo, pero pocas de las especies nativas son capaces de formar arrecifes, por eso hay muy pocas estructuras de ese tipo en el Mediterráneo, lo que hace que este nuevo arrecife sea tan especial.

También en el mar se ha descubierto el primer animal que no necesita oxígeno para vivir: el cnidario parásito *Henneguya salminicola* no tiene ni mitocondrias propiamente dichas ni el genoma de las mismas, por lo que no tiene genes responsables de la respiración celular. Como muchos parásitos, el *H. salminicola* tiene dos estadios de vida para los cuales necesita dos huéspedes: uno de ellos es el salmón, en cuyos músculos anida el cnidario en forma de quiste blanco, y el otro huésped es un gusano. Tener un inquilino en los músculos suena asqueroso, pero parece que al salmón no le importa y no es dañino para él. Dado que el tejido muscular es un lugar anaeróbico, es decir, pobre en oxígeno, y que el gusano que será su huésped posteriormente también vive en un clima anaeróbico, tiene sentido que el parásito esté adaptado a la falta de oxígeno y se haya deshecho de su mitocondria siguiendo el lema «Si no pagas, a la calle». No obstante, aún no se sabe cómo obtiene la energía sin oxígeno.



El parásito *Henneguya salminicola* se parece a la cabeza de un alienígena, eso sí, lo que parecen ojos son en realidad cnidocitos, que, a diferencia de las medusas, no les sirven para capturar presas sino huéspedes. Usa su cola en forma de látigo para adherirse al huésped.

También fue espectacular el descubrimiento de peces abisales de color negro profundo. Se han encontrado dieciséis especies de peces que son tan negros que apenas se pueden fotografiar, en las fotos solo aparecen como siluetas y, para hacerles fotos realistas, solo se pueden iluminar con un dispositivo de luz estroboscópica. Su piel tiene pigmentos tan densamente agrupados que absorben cualquier luz que llegue a la profundidad abisal o se genere mediante bioluminiscencia, y reflejan menos del 0,5% de la luz. De este modo, son los animales más oscuros del planeta y se acercan al negro más negro que se haya desarrollado hasta ahora. En 2019, en el Massachusetts Institute of Technology (MIT) se creó por pura casualidad un negro que absorbe hasta el 99,995% de la luz, difuminando todos los contornos visibles. El efecto es tan grande que los objetos pintados con ese color pierden su dimensión espacial y parecen ser planos y bidimensionales.



El dragón negro del Pacífico, *Idiacanthus antrostomus*, fue el segundo pez más negro del estudio. Las hembras viven a una profundidad de hasta 2.000 metros y alcanzan unos 60 centímetros de largo. En el abdomen y la espalda tienen órganos lumínicos con los que producen luz para comunicarse con sus congéneres. El órgano lumínico que les cuelga de la barbilla sirve como cebo para capturar presas. Los machos son claramente más pequeños, no tienen dientes y, si se los describe con precisión, no son más que un escroto nadador con una tarea corta e importante en la vida: reproducirse.

Para poder descubrir todos estos fascinantes secretos que se esconden en los océanos, debemos asegurarnos de que sus habitantes sigan pudiendo sobrevivir. A lo largo del libro he mencionado algunos de los peligros que amenazan los mares y a su flora y fauna, como la polución, la sobrepesca, la contaminación acústica o la minería en aguas profundas, pero hay muchos más. El calentamiento del planeta y con él del océano y, en particular, la acidificación del agua del mar por el aumento del contenido en dióxido de carbono en la atmósfera son amenazas serias. Dado que las personas somos responsables de estos peligros, es responsabilidad nuestra hacer algo al respecto y proteger mejor los ecosistemas marinos. A grandes rasgos, esto debe hacerse a nivel político, donde, poco a poco, el futuro del mar va ganando audiencia. La ONU está prestando mucha atención a la investigación de los mares y ya ha dedicado toda una década a la investigación marina para el desarrollo sostenible (2021-2030). Los jefes de Estado de catorce países, entre ellos, Canadá, Australia, México, Namibia, Palau y Noruega han creado el Ocean Panel y, en su Ocean Action Agenda, han prometido hacer un uso 100% sostenible de sus recursos marinos nacionales para 2025, y quieren predicar con el ejemplo y motivar a otros países para adherirse. La UE también se ha puesto metas muy ambiciosas con su Mission Starfish 2030 para

proteger nuestros océanos o, al menos, las aguas europeas. Entre sus diecisiete objetivos definidos se encuentran el fin de la sobrepesca, eliminar la producción de basura plástica, proteger parcial o totalmente un 30% de las aguas europeas y reducir drásticamente el ruido submarino. ¿Se conseguirá todo eso en solo diez años? Lo veremos, aunque definitivamente sería un gran paso en la dirección correcta. No obstante, necesitamos acuerdos y un programa de protección a nivel global, porque la mayoría de los océanos no pertenecen a ningún Estado, sino a toda la humanidad. En 2016, la IUCN (International Union for Conservation of Nature) reclamó que el 30% de los mares del mundo se protejan de aquí a 2030 para conservar la biodiversidad y la diversidad de los ecosistemas. Actualmente, solo el 2% de toda la superficie del mar está protegida por completo, con lo que hay mucho que hacer a este aspecto. Si hemos llegado hasta aquí y si se sigue hablando de estos temas es gracias a una gran cantidad de científicos y científicas, activistas y amantes de los mares que llevan décadas dejándose la piel, el tiempo y el dinero para proteger los océanos. Hay tanta gente maravillosa implicada que podría escribir un libro entero sobre esas personas y su trabajo; personas que tienen los enfoques más diversos y una gran creatividad y capacidad de innovación.

Un buen ejemplo de ello es un grupo que se ha dedicado a visibilizar la pesca ilegal. El problema de la pesca es que es muy costoso vigilar los barcos, sobre todo en mar abierto. Los barcos disponen de Automatic Identification System, o AIS, que son dispositivos de localización que envían de forma continua la identidad del buque, la velocidad y la dirección de navegación a un satélite para evitar colisiones, pero permite vigilar también si se adentran en zonas protegidas del mar. Si se desconecta el AIS, es necesario estar *in situ* en el mar, o bien se pueden usar albatros. Los albatros son enormes aves marinas, de hasta tres metros de envergadura, que Disney hizo famosos en la película *Los rescatadores* por sus dificultades para levantar el vuelo y sus aterrizajes bruscos. Ahí, Disney no tuvo que inventarse nada, porque todo eso se puede observar de forma precisa en la naturaleza, y son maravillosos. Los albatros son aún más elegantes en el aire, y tienen una tremenda resistencia a la hora de volar: algunas de estas aves recorren cientos o miles de kilómetros en busca de alimento, son capaces de reconocer barcos de pesca a treinta kilómetros de distancia y vuelan hasta allí con la esperanza de llevarse su parte de la captura. Esto los convierte en espías perfectos para descubrir barcos «invisibles». En 2018, se equipó a 169 albatros con diminutos detectores que pueden detectar el radar que los barcos necesitan para navegar y para evitar colisiones y enviar esos datos vía satélite casi en tiempo real. Si los datos de ubicación enviados no se

corresponden con lo que se ve en el AIS, está claro que el sistema se ha desconectado voluntariamente. Gracias a los espías alados pudieron descubrir que, durante los seis meses de vigilancia, más de un 25% de los barcos en el Índico sur habían desconectado el AIS en aguas nacionales y más de un tercio en aguas internacionales, en alta mar. Esto no quiere decir obligatoriamente que todos esos barcos hicieran pescas ilegales, pero es posible. Los dispositivos de localización de radar podrían usarse en el futuro en otros animales, como tortugas o tiburones, y crear una especie de «patrulla tiburón» para mantener a raya la pesca ilegal.

Los dispositivos de localización, en este caso los emisores de GPS, ya habían ayudado a descubrir las rutas de los cazadores furtivos de Costa Rica. En América Central, los huevos de tortuga se consideran un manjar y se comercia con ellos a pesar de las prohibiciones. La superstición de que su consumo aumenta la potencia sexual agrava el problema aún más, y yo me pregunto a veces si crear un programa mundial de distribución de Viagra no sería un buen método para proteger la fauna salvaje. Para poder comprender la cadena de suministro de los huevos, se desarrolló el proyecto InvestEGGator. A los científicos les encantan los juegos de palabras. Así es como denominaron un huevo impreso en 3D que tiene el mismo aspecto y tacto que los huevos de verdad y que esconde un emisor GPS en su interior. Oculto entre huevos recién puestos en nidos de tortugas, hizo posible seguir las rutas de los furtivos tras llevarse los huevos hasta los consumidores finales en Costa Rica. El objetivo del InvestEGGator no es arrestar a cada furtivo, sino descubrir sus rutas y los puntos de venta para encontrar a los peces gordos del comercio ilegal de especies salvajes.

A veces, se puede conseguir mucho con métodos muy simples. En 2016, un solo hombre empezó a recoger basura en Versova Beach, en Bombay, y esa acción acabó convirtiéndose en la mayor recogida de basura del mundo. Casi dos años tardaron él y cientos de personas voluntarias que se unieron con el tiempo para retirar las miles de toneladas de basura de la playa. Al final, el esfuerzo mereció la pena, ¡y de qué manera! Después de décadas, las tortugas marinas volvieron a la playa a poner sus huevos.

Cualquier persona de cualquier lugar puede contribuir a proteger los mares, sin necesidad de conocimientos científicos, creatividad o dinero. No tiene por qué ser revolucionario, simplemente con comprar pescado de manera sostenible, consumir menos plástico, usar menos el coche y recoger la basura de la playa de vez en cuando son pasos en la dirección correcta. Y quien quiera más investigación marina, hoy en día tiene muchas otras posibilidades, porque las personas normales ya pueden ver de cerca expediciones: gracias a los vídeos en HD y 4K de

los robots submarinos, no solo obtenemos imágenes nítidas y espectaculares de las profundidades de los océanos, Internet también permite acompañar en directo a los equipos mientras investigan las oscuras aguas profundas. Cada vez más expediciones ofrecen la posibilidad de echar un vistazo retransmitiendo los vídeos de sus inmersiones y comentándolos. A quien esto le siga resultando insuficiente, también puede encontrar en Internet proyectos de ciencia ciudadana en los que se puede apoyar la ciencia directamente, hay proyectos muy diversos que permiten a las personas recabar datos o analizarlos y convertirse así en parte del estudio. Es posible avisar de que se ha encontrado basura plástica en playas o bien enviar fotos del estado de los arrecifes de coral. Quien prefiera no mojarse también puede determinar especies de plancton de muestras de agua cómodamente en el sofá. ¿Quién sabe lo que se esconde todavía ahí fuera? Quizás tú veas en directo el próximo gran descubrimiento.

Fuentes

Acqua Incognita:
Un mar lleno de misterios

Seabed 2013: *https://seabed2030.gebco.net/*.

Mayer, L.; Jakobsson, M.; Allen, G., *et al*., «The Nippon Foundation-GEBCO Seabed 2030 Project: The Quest to See the World's Oceans Completely Mapped by 2030», *Geosciences*, 2018, 8, 63, *https://seabed2030.gebco.net/news/gebco_2020_release.html.*

Zhang, S., «The Search for MH370 Revealed Secrets of the Deep Ocean. A remote part of the Indian Ocean has become, by chance, one of the best-mapped parts of the underwater world», 2017, *https://www.theatlantic.com/science/archive/2017/03/mh370-search-ocean/518946/*.

Stommel, H., *Lost Islands: The Story of Islands That Have Vanished from Nautical*, 2017, Dover Publications Inc.

PHANTOM ISLANDS – A SONIC ATLAS, http://www.andrewpekler.com/phantom-islands/.

https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/geografie-posse-nicht-insel-empoert-mexikaner-a-632387.html.

Watanabe, Y. Y.; Papastamatiou, Y. P., «Distribution, body size and biology of the megamouth shark *Megachasma pelagios*», 2019, *Journal of Fish Biology*, 95, 992-998, *https://doi.org/10.1111/jfb.14007*.

Schrope, M., «Giant squid filmed in its natural environment, Landmark achievement reveals clues to mollusc's behaviour», 2013, *NATURE | NEWS*, *https://www.nature.com/news/giant-squid-filmed-in-its-natural-environment-1.12202.*

Katz, B., «Watch First Footage of Giant Squid Filmed in American Waters, The deep-sea footage also marks a rare sighting of a giant squid in its natural habitat», *Smithsonian Magazine*, 2019, *https://www.smithsonianmag.com/smart-news/first-time-giant-squid-was-filmed-american-waters-180972479.*

Costello, M. J.; Coll, M.; Danovaro, R., *et al*., «2010 A Census of Marine Biodiversity Knowledge, Resources, and Future Challenges», *PLOS ONE* 5(8), e12110, *https://doi.org/10.1371/journal.pone.0012110.*

Appeltans, W.; Ahyong, S. T.; Anderson, G., *et al*., «The Magnitude of Global Marine Species Diversity», 2012, *Current Biology*, 22 (23), 2.189-2.202, *https://doi.org/10.1016/j.cub.2012.09.036*.

Census of Marine Life: *http://www.coml.org/about-census/*

Evans, I., «Like a spiral UFO: world's longest animal discovered in Australian waters», 2020, *The Guardian*.

Cuando los tiburones brillan

Remington, S. J., «Green fluorescent protein: A perspective», 2011, *Protein science: a publication of the Protein Society*, 20(9), 1509-1519, *https://doi.org/10.1002/pro.684*.

Wongsrikeao, P.; Saenz, D.; Rinkoski, T., *et al.*, «Antiviral restriction factor transgenesis in the domestic cat., *Nature methods*, 2011, 8(10), 853-859, *https://doi.org/10.1038/nmeth.1703.*

Matz, M.; Fradkov, A.; Labas, Y., *et al.*, «Fluorescent proteins from nonbioluminescent Anthozoa species», 1999, *Nat Biotechnoly*, 17, 969-973, *https://doi.org/10.1038/13657.*

Gittins, J. R.; D'Angelo, C.; Oswald, F., *et al.*, «Fluorescent protein-mediated colour polymorphism in reef corals: multicopy genes extend the adaptation/acclimatization potential to variable light environments», 2015, *Molecular Ecology*, 24(2), 453-465.

Eyal, G.; Wiedenmann, J.; Grinblat M., *et al.*, «Spectral Diversity and Regulation of Coral Fluorescence in a Mesophotic Reef Habitat in the Red Sea», 2015, *PLOS ONE*, 10(6), e0128697, *https://doi.org/10.1371/journal.pone.0128697.*

Smith, E. G.; D'Angelo, C.; Sharon, Y., *et al.*, «Acclimatization of symbiotic corals to mesophotic light environments through wavelength transformation by fluorescent protein pigments», 2017, *Proceedings of the Royal Society*, B.28420170320, *http://doi.org/10.1098/rspb.2017.0320.*

Sparks, J. S.; Schelly, R. C.; Smith ,W. L., *et al.*, «The Covert World of Fish Biofluorescence: A Phylogenetically Widespread and Phenotypically Variable Phenomenon», 2014, *PLOS ONE*, 9(1), e83259.

Haddock, S. H. D.; Dunn, C. W., «Fluorescent proteins function as a prey attractant: experimental evidence
from the hydromedusa *Olindias formosus* and other
marine organisms», 2015, *Biology Open*, 4, 1094-1104, doi, 10.1242/bio.012138, *https://bio.biologists.org/content/4/9/1094.*

Gruber, D.; Loew, E.; Deheyn, D. *et al.*, «Biofluorescence in Catsharks (Scyliorhinidae): Fundamental Description and Relevance for Elasmobranch», 2016, *Visual Ecology*, informe 6, 24751, *https://doi.org/10.1038/srep24751.*

Park, H. B.; Lam, Y. C.; Gaffney, J. P., *et al.*, «Bright Green Biofluorescence in Sharks Derives from Bromo-Kynurenine Metabolism», 2019, *iScience*, 19, 1291-1336, *https://doi.org/10.1016/j.isci.2019.07.019.*

Gruber, D.; Sparks, J., «First Observation of Fluorescence in Marine Turtles», 2015, *American Museum Novitates*, 3845, 1-8, *https://doi.org/10.1206/3845.1*.

Linda, M., «Fluorescent diving: Seeing the ocean in a new light», 2017, *https://www.aquarium.co.za/blog/entry/fluorescent-diving-seeing-the-ocean-in-a-new-light*.

Compagno, L. J. V.; Dando, M.; Fowler, S. L., *Sharks of the World*, Princeton University Press, Princeton, 2005.

Tian, L.; Yin, Y.; Jin, H., *et al.*, «Novel marine antifouling coatings inspired by corals», 2020, *Mater Today Chemistry Journal*, 17, 100294.

Macel, M.; Ristoratore, F.; Locascio, A. *et al.*, «Sea as a color palette: the ecology and evolution of fluorescence», 2020, *Zoological Letters*, 6, 9.

Mazel C., «Method for Determining the Contribution of Fluorescence to an Optical Signature, with Implications for Postulating a Visual Function», 2017, *Frontiers in Marine Science*, 4, 266, *https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2017.00266/full.*

Criaturas ancestrales

Grimm, D., «The Mushroom Cloud's Silver Lining», 2008, *Science*, 321 (5895), 1434-1437.

Bonani, G.; Ivy, S.; Hajdas, I., *et al.*, «Ams ^{14}C Age Determinations of Tissue, Bone and Grass Samples from the Ötztal Ice Man», 1994, *Radiocarbon*, 36(2), 247-250,

https://www.cambridge.org/core/journals/radiocarbon/article/ams-14c-age-determinations-of-tissue-bone-and-grass-samples-from-the-otztal-ice-man/91BC7943558A041387DEEDD6E4A82071.

Harry A. V., «Evidence for systemic age underestimation in shark and ray ageing studies», 2018, *Fish and Fisheries*, 19, 185-200, *https://doi.org/10.1111/faf.12243*.

Hamady, L. L.; Natanson, L. J.; Skomal, G. B.; Thorrold, S. R., «Vertebral Bomb Radiocarbon Suggests Extreme Longevity in White Sharks», 2014, *PLOS ONE*, 9(1): e84006, *https://doi.org/10.1371/journal.pone.0084006*.

«Orange roughy», *Marine Stewardship Council*: *https://www.msc.org/en-au/what-you-can-do/eat-sustainable-seafood/fish-to-eat-seafood-guide-australia-new-zealand/is-orange-roughy-sustainable*.

«Orange roughy –a 'sustainable' fish certification too far», Greenpeace Blog, 2016, *https://storage.googleapis.com/gpuk-archive/blog/oceans/orange-roughy-%E2%80%93-%E2%80%98sustainable%E2%80%99-fish-certification-too-far-20160621.html*.

«WWF disappointed about certification of New Zealand orange roughy», WWF, 2016, *https://wwf.panda.org/wwf_news/press_releases/?287431/WWF-disappointed-about-certification-of-New-Zealand-orange-roughy-fishery*.

Nielsen, J.; Hedeholm, R. B.; Heinemeier, J., *et al.*, «Eye lens radiocarbon reveals centuries of longevity in the Greenland shark (*Somniosus microcephalus*)», 2016, *Science*, 353(6300), 702-4.

MacNeil, M. A.; McMeans, B. C.; Hussey, N. E., *et al.*, «Biology of the Greenland shark *Somniosus microcephalus*», 2012, *Journal of Fish Biology*, 80, 991-1018, https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1095-8649.2012.03257.x.

Edwards, J. E.; Hiltz, E.; Broell, F., *et al.*, «Advancing Research for the Management of Long-Lived Species: A Case Study on the Greenland Shark», 2019, *Frontiers in Marine Science*, 6:87, https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2019.00087/full.

Butler, P. G.; Wanamaker, A. D.; Scourse, J. D., *et al.*, «Variability of marine climate on the North Icelandic Shelf in a 1357-year proxy archive based on growth increments in the bivalve *Arctica islandica*», 2013, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 373, 141-151, *https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2012.01.016*.

Wang, X.; Schröder, H. C.; Müller, W. E. G., «Giant siliceous spicules from the deep-sea glass sponge *Monorhaphis chuni*», 2009, *International Review of Cell and Molecular Biology* 273, 69-115.

Jochum, K. P.; Wang, X.; Vennemann, T. W., *et al.*, «Siliceous deep-sea sponge *Monorhaphis chuni*: A potential paleoclimate archive in ancient animals», 2012, *Chemical Geology Journal,* 300-301:143-51, *https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.01.009*.

Jochum, K. P.; Schuessler, J. A.; Wang, X., *et al.*, «Whole-ocean changes in silica and Ge/Siratios during the last deglacial deduced from long-lived giant glass sponges», 2017, *Geophysical Research Letters,* 44, 11, 555-11, 564, *https://doi.org/10.1002/2017GL073897*.

Podbregar, N., «Tiefe Biosphäre: Rätselhafte Lebenswelt im "Keller der Erde"», 2020, *Scinexx das wissensmagazin*, https://www.scinexx.de/dossier/tiefe-biosphaere-2/.

Morono, Y.; Ito, M.; Hoshino, T., *et al.*, «Aerobic microbial life persists in oxic marine sediment as old as 101.5 million years», 2020, *Nature Communications*, 11, 3626, *https://doi.org/10.1038/s41467-020-17330-1*.

Matsumoto, Y.; Piraino, S.; Miglietta, M. P., «Transcriptome Characterization of

Reverse Development in *Turritopsis dohrnii* (Hydrozoa, Cnidaria)», 2019, *G3*, 9(12), 4127-4138, *https://doi.org/10.1534/g3.119.400487*.

Guest, P. C., «Of Mice, Whales, Jellyfish and Men: In Pursuit of Increased Longevity», 2019, 1178, 1-24, *https://doi.org/10.1007/978-3-030-25650-0_1*.

Petralia, R. S.; Mattson, M. P.; Yao, P. J., «Aging and longevity in the simplest animals and the quest for immortality», 2014, *Ageing research reviews*, 16, 66-82, *https://doi.org/10.1016/j.arr.2014.05.003*.

West Michael, D., «Chapter 16 – Regenerative Medicine and Ageing: Is Senescence Reprogrammable?», en Vertès, A. A.; Smith, D. M.; Qureshi, N.; Dowden, N. J., eds., *Second Generation Cell and Gene-based Therapies*, 2020, *Academic Press*, 449-460, *https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812034-7.00016-9*.

El idioma de los delfines

Plinio el Viejo, *Historia natural*, libros 8 y 9.

Benjamin, F., *Journal of Occurences in My Voyage to Philadelphia on board the Berkshire, Henry Clark, Master, From London*, *http://www.let.rug.nl/usa/documents/1701-1750/benjamin-franklin-journal-of-a-voyage-from-england-to-philadelphia-1726.php*.

Riley, Ch., «The girl who talked to Dolphins», 2014, *BBC Dokumentation*.

Wade N., «Does man alone have language? Apes reply in riddles, and a horse says neigh», 1980, *Science*, 208(4450), 1349-1351, *https://www.science.org/doi/10.1126/science.7375943*.

Peña-Guzmán, D. M., «Can nonhuman animals commit suicide?», 2017, *Animal Sentience*, 20(1), *https://www.wellbeingintlstudiesrepository.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1201&context=animsent*.

Pepperberg, I. M., «Animal language studies: What happened?», 2017, *Psychonomic Bulletin & Review*, 24(1), 181-185, https://link.springer.com/article/10.3758/s13423-016-1101-y.

Thewissen, J. G. M.; Cooper, L. N.; George, J. C. *et al.*, «From Land to Water: the Origin of Whales, Dolphins, and Porpoises», 2009, *Evo Edu Outreach,* 2, 272-288, *https://doi.org/10.1007/s12052-009-0135-2*

Fox, K. C. R.; Muthukrishna, M.; Shultz, S., «The social and cultural roots of whale and dolphin brains», 2017, *Nature, Ecology & Evolution*, 1, 1699-1705, *https://doi.org/10.1038/s41559-017-0336-y*.

Bizzozzero, M. R.; Allen, S. J.; Gerber, L., *et al.*, «Tool use and social homophily among male bottlenose dolphins», 2019, *Proceedings of the Royal Society*, B.28620190898, *http://doi.org/10.1098/rspb.2019.0898*.

Reiss, D., Marino, L., «Mirror self-recognition in the bottlenose dolphin: a case of cognitive convergence», 2001, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98(10), 5937-5942, *https://doi.org/10.1073/pnas.101086398*.

Morrison, R.; Reiss D., «Precocious development of self-awareness in dolphins», 2018, *PLOS ONE*, 13(1), e0189813, *https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189813*.

Mann, J.; Sargeant, B. L.; Watson-Capps, J. J., *et al.*, «Why Do Dolphins Carry Sponges?», 2008, *PLOS ONE*, 3(12), e3868, *https://doi.org/10.1371/journal.pone.0003868*.

«Dolphins Getting High on Fish Toxin? Or Just a Load of Puff?», 2014, *NBC Science News*, *https://www.nbcnews.com/science/science-news/dolphins-getting-high-fish-toxin-*

or-just-load-puff-n3691.

Jones, B., Zapetis, M.; Samuelson, M. M.; Ridgway, S., «Sounds produced by bottlenose dolphins (Tursiops): a review of the defining characteristics and acoustic criteria of the dolphin vocal repertoire», 2020, *Bioacoustics*, 29 (4), 399-440, *https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09524622.2019.1613265?journalCode=tbio20*.

Killebrew, D. A.; Mercado III, E.; Herman, L. M.; Pack, A. A., «Sound production of a neonate bottlenose Dolphin», 2001, *Aquatic Mammals*, 27, 34-44.

Behrmann, G., «Anatomie des Zahnwalkopfes 1», 2000, 4, *Bremerhaven*, *https://epic.awi.de/id/eprint/21901/1/Beh2000c.pdf*.

Behrmann, G., «Anatomie des Zahnwalkopfes 2», 2000, 4, *https://epic.awi.de/21902/1/Beh2000d.pdf*.

Berta, A.; Ekdale, E. G.; Cranford, T. W., «Review of the cetacean nose: form, function, and evolution», 2014, *The Anatomical Record*, 297(11), 2205-2215, *https://anatomypubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ar.23034*.

Pack, A., «Language Research: Dolphins», en *Encyclopedia of Animal Cognition and Behavior*, 2018, *Springer Nature*, Suiza, *https://doi.org/10.1007/978-3-319-47829-6*.

Kassewitz, J.; Hyson, M. T.; Reid, J. S.; Barrera, R. L., «A Phenomenon Discovered While Imaging Dolphin Echolocation Sounds», 2016, *Journal of Marine Science Research and Development*, 6:202, https://www.omicsonline.org/open-access/a-phenomenon-discovered-while-imaging-dolphin-echolocation-sounds-2155-9910-1000202.php?aid=76570.

Sayigh, L. S.; Wells, R. S.; Janik, V. M., «What's in a voice? Dolphins do not use voice cues for individual recognition», 2017, *Animal cognition*, 20(6), 1067-1079, *https://doi.org/10.1007/s10071-017-1123-5*.

Bruck, J. N., «Decades-long social memory in bottlenose dolphins», 2013, *Proceedings of the Royal Society*, B.28020131726, *https://doi.org/10.1098/rspb.2013.1726*.

Herzing, D. L., «Acoustics and Social Behavior of Wild Dolphins: Implications for a Sound Society», en Au W. W. L.; Fay, R. R.; Popper, A. N., eds., *Hearing by Whales and Dolphins*, 2000, Springer Handbook of Auditory Research, 12.

The Wild Dolphin Project, *http://www.wilddolphinproject.org/our-research/chat-research/*.

Kohlsdorf, D.; Herzing, D. L.; Starner, T.,«An Auto Encoder For Audio Dolphin Communication», 2020, *ArXiv*, 2005.07623, *https://arxiv.org/pdf/2005.07623.pdf*.

Marino, L., «Large Brains in Small Tanks: Intelligence and Social Complexity as an Ethical Issue for Captive Dolphins and Whales», en Johnson, L.; Fenton, A.; Shriver, A., eds., *Neuroethics and Nonhuman Animals*, 2020, Advances in Neuroethics, Springer, *https://doi.org/10.1007/978-3-030-31011-0_10*.

El plástico perdido

Moore Ch., «Trashed – Across the Pacific Ocean, Plastics, Plastics, Everywhere, 2003, *Natural history*, 112, 46-51.

Lebreton L., Slat B., Ferrari F. *et al.*, «Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic», 2018, *Scientific Reports*, 8, 4666, *https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w*.

Eriksen, M.; Lebreton, L. C. M.; Carson, H. S., *et al.*, «Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea», 2014, *PLOS ONE*, 9, e111913, *https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913*.

Jambeck, J. R.; Geyer, R.; Wilcox, C., *et al.*, «Plastic waste inputs from land into the ocean», 2015, *Science*, 347, 768-771, *https://doi.org/10.1126/science.1260352.*

Geyer, R.; Jambeck, J. R.; Law, K. L., «Production, use, and fate of all plastics ever made», 2017, *Science Advances*, 3, e1700782, *https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782.*

Walpole, S. C.; Prieto-Merino, D.; Edwards P., *et al.*, «The weight of nations: an estimation of adult human biomass», 2012, *BMC Public Health*, 12, 439, *https://doi.org/10.1186/1471-2458-12-439.*

Thompson, R. C.; Olsen, Y.; Mitchell, R. P., *et al.*, «Lost at Sea: Where Is All the Plastic?», 2004, *Science*, 304, 838-838, *https://doi.org/10.1126/science.1094559.*

Cózar, A.; Sanz-Martín, M.; Martí, E., *et al.*, «Plastic Accumulation in the Mediterranean Sea», 2015, *PLOS ONE*, 10(4), e0121762, *https://doi.org/10.1371/journal.pone.0121762.*

Mariana, T., «Deepest-ever sub dive finds plastic bag», 2019, *BBC News*, *https://www.bbc.com/news/science-environment-48230157.*

Bergmann, M.; Klages, M., «Increase of litter at the Arctic deep-sea observatory HAUSGARTEN», 2012, *Marine Pollution Bulletin*, 64, 2734-2741, *https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025326X12004687.*

Mordecai, G.; Tyler, P. A.; Masson, D. G.; Huvenne, V. A. I., «Litter in submarine canyons off the west coast of Portugal», 2011, en *Deep Sea Res. Part II Topical Studies in Oceanography*, 2489-2496, *https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2011.08.009*

Krause, S.; Molari, M.; Gorb, E. V., *et al.*, «Persistence of plastic debris and its colonization by bacterial communities after two decades on the abyssal seafloor», 2020, *Scientific Reports*, 10, 9484, *https://doi.org/10.1038/s41598-020-66361-7.*

Egger, M.; Sulu-Gambari, F.; Lebreton, L., «First evidence of plastic fallout from the North Pacific Garbage Patch», 2020, *Scientific Reports*, 10, 7495, *https://doi.org/10.1038/s41598-020-64465-8.*

Lavers, J. L.; Bond, A. L., «Exceptional and rapid accumulation of anthropogenic debris on one of the world's most remote and pristine islands», 2017, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114, 6052-6055, *https://doi.org/10.1073/pnas.1619818114.*

Peeken, I.; Primpke, S.; Beyer, B., *et al.*, «Arctic sea ice is an important temporal sink and means of transport for microplastic», 2018, *Nature Communications*, 9, 1505, *https://doi.org/10.1038/s41467-018-03825-5.*

Kelly, A.; Lannuzel, D.; Rodemann, T.; Meiners, K. M.; Auman, H. J., «Microplastic contamination in east Antarctic sea ice», 2020, *Marine Pollution Bulletin*, 154, 111130, *https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111130.*

Duncan, E. M.; Arrowsmith, J. A.; Bain, C. E., *et al.*, «Diet-related selectivity of microplastic ingestion in green turtles (Chelonia mydas) in the eastern Mediterranean», 2019, *Scientific Reports*, 9, 11581, *https://doi.org/10.1038/s41598-019-48086-4.*

Van Franeker, J. A.; Kühn, S., «Fulmar Litter EcoQO monitoring in the Netherlands – update 2019», 2020, Wageningen Marine Research, C074/20, *https://doi.org/10.18174/529399.*

Gigault, J., *et al.*, «Current opinion: What is a nanoplastic?», 2020, *Environmental Pollution*, *https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.024.*

Lehner, R.; Weder, C.; Petri-Fink, A.; Rothen-Rutishauser, B., «Emergence of Nanoplastic in the Environment and Possible Impact on Human Health», 2019, *Environmental Science and Technology*, 53, 1748-1765, *https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05512*.

Wagner, S.; Reemtsma, T., «Things we know and don't know about nanoplastic in the environment», 2019, *Nature Nanotechnology*, 14, 300-301, *https://doi.org/10.1038/s41565-019-0424-z*.

Warner, K.; Linske, E.; Mustain, P.; Valliant, M.; Leavitt, C., «Choked, Strangled, Drowned: The Plastics Crisis Unfolding In Our Oceans», 2020, *Oceana Report*, https://usa.oceana.org/wp-content/uploads/sites/4/report_spreadsdoi_choked_strangled_drowned_final.pdf.

De la Torre, G. E., «Microplastics: an emerging threat to food security and human health», 2020, *Journal of Food Science and Technology*, 57, 1601-1608, *https://doi.org/10.1007/s13197-019-04138-1*.

Kaandorp, M. L. A.; Dijkstra, H. A.; Van Sebille E., «Closing the Mediterranean Marine Floating Plastic Mass Budget: Inverse Modeling of Sources and Sinks», 2020, *Environmental Science and Technology*, 54, 11980-11989, *https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01984*.

Pabortsava, K.; Lampitt, R. S., «High concentrations of plastic hidden beneath the surface of the Atlantic Ocean», 2020, *Nature Communications*, 11, 4073, *https://doi.org/10.1038/s41467-020-17932-9*.

Barrett, J.; Chase, Z.; Zhang, J., *et al.*, «Microplastic Pollution in Deep-Sea Sediments From the Great Australian Bight», 2020, *Frontiers in Marine Science*, 7, 808, *https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2020.576170*.

Welden Natalie A., «Chapter 8 – The environmental impacts of plastic pollution», en Letcher, T. M., ed., *Plastic Waste and Recycling*, 2020, Academic Press, 195-222, *https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817880-5.00008-6*.

Burns, E. E.; Boxall, A. B. A., «Microplastics in the aquatic environment: Evidence for or against adverse impacts and major knowledge gaps», 2018, *Environmental Toxicology and Chemistry*, 37, 2776-2796, *https://doi.org/10.1002/etc.4268*.

Law, K. L.; Starr, N.; Siegler, T. R., *et al.*, «The United States' contribution of plastic waste to land and ocean», 2020, *Science Advances*, 6, eabd0288, *https://doi.org/10.1126/sciadv.abd0288*.

Scaffaro, R.; Maio, A.; Sutera, F., *et al.*, «Degradation and Recycling of Films Based on Biodegradable Polymers: A Short Review», 2019, *Polymers*, 11, 651, *https://doi.org/10.3390/polym11040651*.

Hohn, S.; Acevedo-Trejos, E.; Abrams, J. F., *et al.*, «The long-term legacy of plastic mass production», 2020, *Science of the Total Environment*, 746, 141115, *https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141115*.

Lebreton, L.; Egger, M.; Slat, B., «A global mass budget for positively buoyant macroplastic debris in the ocean», 2019, *Scientific Reports*, 9, 12922, *https://doi.org/10.1038/s41598-019-49413-5*.

Ocean Conservancy: «Together we are Team Ocean», 2020, *https://oceanconservancy.org/wp-content/uploads/2020/ 09/2020-Report_-FINAL.pdf*.

Ragusa, A.; Svelato, A.; Santacroce, C., *et al.*, «Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta», 2021, *Environment International*, 146, 106274, *https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274*.

Cantor, J., «Why Horror Doesn't Die: The Enduring and Paradoxical Effects of Frightening Entertainment», en Bryant, J.; Vorderer, P., eds., *Psychology of entertainmen,* Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 2006, 315-327.

Cantor J., Omdahl B. L., «Effects of fictional media depictions of realistic threats on children's emotional responses, expectations, worries, and liking for related activities», 1991, *Communication Monographs*, 58:4, 384-401, *https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03637759109376237*

International Shark Attack File: https://www.floridamuseum.ufl.edu/shark-attacks/.

Hammerschlag, N.; Gallagher, A. J.; Lazarre, D. M., «A review of shark satellite tagging studies», 2011, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 398, 1-2, 1-8, *https://doi.org/10.1016/j.jembe.2010.12.012*.

Jewell, O. J.; Wcisel, M. A.; Gennari, E., *et al.*, «Effects of Smart Position Only (SPOT) tag deployment on white sharks Carcharodon carcharias in South Africa», 2011, *PLOS ONE*, 6(11), e27242, *https://doi.org/10.1371/journal.pone.0027242.*

Boustany, A.; Davis, S.; Pyle, P., *et al.*, «Expanded niche for white sharks», 2002, *Nature*, 415, 35-36, *https://doi.org/10.1038/415035b.*

Live from the White Shark Cafe – Sharing expedition results, *https://www.youtube.com/watch?v=C_HsAZrjDpg*.

Jorgensen S. J.; Reeb, C. A.; Chapple, T. K., *et al.*, «Philopatry and migration of Pacific white sharks», 2009, *Proceedings of the Royal Society*, B.277679-688, *http://doi.org/10.1098/rspb.2009.1155.*

Jorgensen S. J.; Arnoldi, N. S.; Estess, E. E., *et al.*, «Eating or Meeting? Cluster Analysis Reveals Intricacies of White Shark (*Carcharodon carcharias*) Migration and Offshore Behavior», 2012, *PLOS ONE*, 7(10), e47819, *https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047819.*

De Maddalena, A.; Bänsch, H., *Haie im Mittelmeer*, 2005, Franckh Kosmos, Verlag, Stuttgart.

«Beauty and the Beast – Shark in our Beauty Creams», 2015, Bloom Association, *http://www.bloomassociation.org/en/wp-content/uploads/2018/04/squalane-bloom-english-1.pdf.*

Vannuccini, S., *Shark Utilization, Marketing and Trade*, 1999, FAO Fisheries Technical Paper, Roma.

Shiffman, D. S.; Bittick, S. J.; Cashion, M. S., *et al.*, «Inaccurate and Biased Global Media Coverage Underlies Public Misunderstanding of Shark Conservation Threats and Solutions», 2020, *iScience*, 23, 6, 101205, *https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101205*.

SharkSmart: *https://www.sharksmart.nsw.gov.au/techno.*

Phillips, B. T.; Dunbabin, M.; Henning, B.; Howell, C., *et al.*, «Exploring the Sharkano: Biogeochemical Observations of the Kavachi Submarine Volcano (Solomon Islands)», 2016, *Oceanography*, 29, 4, 160-169, *www.jstor.org/stable/24862291*.

«These Sharks Thrive Inside an Underwater Volcano», National Geographic, *https://www.nationalgeographic.com/news/ 2017/04/sharks-underwater-volcano-sharkcano-kavachi/.*

Nubes abisales

Buschmann, C.; Grumbach, K., «Chemosynthese», en *Physiologie der Photosynthese*, 1985, Springer, *https://doi.org/10.1007/978-3-642-70255-6_8*.

Castro, P.; Huber, M. E., *Marine biology/original artwork by William C. Ober and Claire W. Garrison*, 2008, McGraw-Hill, New York.

Dick, G. J., «The microbiomes of deep-sea hydrothermal vents: distributed globally, shaped locally», 2019, *Nature Reviews Microbiology*, 17, 271-283, *https://doi.org/10.1038/s41579-019-0160-2*.

Hinzke, T.; Kleiner, M., Breusing, C., *et al.*, «Host-Microbe Interactions in the Chemosynthetic Riftia pachyptila Symbiosis», 2019, *mBio*, 10(6), e02243-19, *https://doi.org/10.1128/mBio.02243-19*.

Phillips, B. T., «Beyond the vent: New perspectives on hydrothermal plumes and pelagic biology», en *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2017, 137, 480-485, *https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2016.10.005*.

Brennan, T. Phillips, «The Influence of Hydrothermal Plumes on Midwater Ecology, and a New Method to Assess Pelagic Biomass», 2016, University of Rhode Island DigitalCommons@URI, *https://doi.org/10.23860/diss-phillips-brennan-2016*.

Burd, B. J.; Thomson, R. E., «The importance of hydrothermal venting to water-column secondary production in the northeast Pacific», en *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2015, 121, 85-94, *https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2015.04.014*.

Dick, G.; Anantharaman, K., Baker B., *et al.*, «The microbiology of deep-sea hydrothermal vent plumes: ecological and biogeographic linkages to seafloor and water column hábitats», 2013, *Frontiers in Microbiology*, 4, 124, *https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmicb.2013.00124*.

Soule, D.; Wilcock, W., «Fin whale tracks recorded by a seismic network on the Juan de Fuca Ridge, Northeast Pacific Ocean», 2013, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133, 1751-1761, *https://doi.org/10.1121/1.4774275*.

Ardyna, M.; Lacour, L.; Sergi S., *et al.*, «Hydrothermal vents trigger massive phytoplankton blooms in the Southern Ocean», 2019, *Nature Communications*, 10, 2451, *https://doi.org/10.1038/s41467-019-09973-6*.

Martin, W.; Baross, J.; Kelley, D., *et al.*, «Hydrothermal vents and the origin of life», 2008, *Nature Reviews Microbiology*, 6, 805-814, *https://doi.org/10.1038/nrmicro1991*

Jordan, S. F.; Rammu, H.; Zheludev, I. N., *et al.*, «Promotion of protocell self-assembly from mixed amphiphiles at the origin of life», 2019, *Nature, Ecology and Evolution*, 3, 1705-1714, *https://doi.org/10.1038/s41559-019-1015-y*.

Van Dover, C. L., «Impacts of anthropogenic disturbances at deep-sea hydrothermal vent ecosystems: A review», 2014, *Marine Environmental Research*, 102, 59-72, *https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2014.03.008*.

Turner, P. J.; Thaler, A. D.; Freitag, A.; Collins, P. C., «Deep-sea hydrothermal vent ecosystem principles: Identification of ecosystem processes, services and communication of value», 2019, *Marine Policy*, 101, 118-124, *https://doi.org/10.1016/j.marpol.2019.01.003*.

Bailarines acuáticos
de seis patas

Andersen, N.; Cheng, L., «The marine insect Halobates (Heteroptera: Gerridae): Biology, adaptations, distribution, and phylogeny», 2004, *Oceanography and Marine*

Biology: An Annual Review, 42, 119-180.
Mahadik, G. A.; Agustí, S., Duarte, C. M., «Distribution and Characteristics of *Halobates germanus* Population in the Red Sea», 2019, *Frontiers in Marine Science*, 6, 276, *https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2019.00408*
Foster, W. F., «Zonation, behaviour and morphology of the intertidal coral-treader *Hermatobates* (Hemiptera: Hermatobatidae) in the south-west Pacific», 1989, *Zoological Journal of the Linnean Society*, 96, 1, 87-105, *https://doi.org/10.1111/j.1096-3642.1989.tb01822.x.*
Polhemus, J. T.; Polhemus, D. A., «A Review of the Genus *Hermatobates* (Heteroptera: Hermatobatidae), with Descriptions of Two New Species», 2013, *Entomologica Americana* 118(1), 202-241, *https://doi.org/10.1664/12-RA-018.1.*
Kaiser, T. S.; Neumann, D.; Heckel, D. G., «Timing the tides: Genetic control of diurnal and lunar emergence times is correlated in the marine midge *Clunio marinus*», 2011, *BMC Genet*, 12, 49, *https://doi.org/10.1186/1471-2156-12-49.*
Olander, R.; Palmén, E., «Taxonomy, Ecology and Behaviour of the Northern Baltic Clunio Marinus Halid. (Dipt., Chironomidae)», 2020, *Annales Zoologici Fennici*, 5, 1, 97-110, https://www.jstor.org/stable/23731451.
Qi, X.; Lin, X.; Ekrem, T., *et al.*, «A new surface gliding species of Chironomidae: An independent invasion of marine environments and its evolutionary implications», 2019, *Zoologica Scripta*, 48, 81-92, *https://doi.org/10.1111/zsc.12331.*
Ruxton, G. D.; Humphries S., «Can ecological and evolutionary arguments solve the riddle of the missing marine insects?», 2008, *Marine Ecology*, 29, 72-75, https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1439-0485.2007.00217.x.
Glenner, H.; Thomsen, P. F.; Hebsgaard, M. B.; *et al.*, «The Origin of Insects», 2006, *Science*, 1883-1884, https://www.science.org/doi/10.1126/science.1129844.
Lozano-Fernández, J.; Carton, R.; Tanner, A. R., *et al.*, «A molecular palaeobiological exploration of arthropod terrestrialization», 2016, *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 371, 20150133, *http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2015.0133.*
Luo, J.; Chen, P.; Wang, Y.; Xie, Q., «First record of *Hermatobatidae* from China, with description of *Hermatobates lingyangjiaoensis* sp. n. *(Hemiptera: Heteroptera)*», 2019, *Zootaxa,* 4679(3), https://www.biotaxa.org/Zootaxa/article/view/zootaxa.4679.3.6.

Cómo ven el mundo los peces

Gegenfurtner, K. R.; Bloj, M.; Toscani M., «The many colours of 'the dress'», 2015, *Current Biology*, 25, 13, R543-R544, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960982215004947.
Wallisch, P., «Illumination assumptions account for individual differences in the perceptual interpretation of a profoundly ambiguous stimulus in the color domain: 'The dress'», 2017, *Journal of Vision*, 17, 5, *https://doi.org/10.1167/17.4.5.*
Coren, S.; Girgus, J. S., *Seeing is Deceiving: The Psychology of Visual Illusions*, 1978, Routledge, Abingdon-on-Thames.
Marshall, J.; Carleton, K. L.; Cronin, T., «Colour vision in marine organisms, Current Opinion in Neurobiology», 2015, 34, 86-94, *https://doi.org/10.1016/j.conb.2015.02.002.*
Balcombe, J., *What a Fish Knows: The Inner Lives of Our Underwater Cousins*, 2016, Scientific America (Farrar, Straus and Giroux), Nueva York.
Wehner, R.; Gehring, W., *Zoologie*, 1995, Thieme, Stuttgart.

Doherty, M. J.; Campbell, N. M.; Tsuji, H.; Phillips, W. A., «The Ebbinghaus illusion deceives adults but not young children», 2010, *Developmental Science*, 13(5), 714-721.

Santacà, M.; Agrillo, C., «Perception of the Müller–Lyer illusion in guppies», 2020, *Current Zoology*, 66, 2, 205-213, *https://doi.org/10.1093/cz/zoz041*.

Agrillo, C.; Miletto Petrazzini, M. E.; Bisazza, A., «Numerical abilities in fish: a methodological review», 2017, *Behavioural Processes*, 141, 161-171, *https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0376635717300487?via%3Dihub*.

Agrillo, C.; Parrish, A. E.; Beran, M. J., «How illusory is the solitaire illusion? Assessing the degree of misperception of numerosity in adult humans», 2016, *Frontiers in Psychology*, 7, 1663, *https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2016.01663/full*.

Gómez-Laplaza, L. M.; Díaz-Sotelo, E.; Gerlaib, R., «Quantity discrimination in angelfish, *Pterophyllum scalare*: a novel approach with food as the discriminant», 2018, *Animal Behaviour*, 142, 19-30, *https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2018.06.001*.

Henrich, J.; Heine, S. J.; Norenzayan, A., «The Weirdest People in the World?», 2010, *RatSWD Working Paper*, 139, *http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1601785*.

Eagleman, D. M., «Visual illusions and neurobiology», 2001, *Nature Reviews Neuroscience*, 2, 920-926, *https://doi.org/10.1038/35104092*.

Bshary, R.; Wickler, W.; Fricke, H., «Fish cognition: a primate's eye», 2002, Animal Cognition, 5, 1-13, *https://doi.org/10.1007/s10071-001-0116-5*.

El mar se vuelve viral

Machery, E., «Why I stopped worrying about the definition of life... and why you should as well», 2012, *Synthese*, 185, 145-164, *https://doi.org/10.1007/s11229-011-9880-1*.

Breitbart, M.; Thompson, L. R.; Suttle, C. A., *et al.*, «Exploring the Vast Diversity of Marine Viruses», 2007, *Oceanography*, 20, 135-139, *http://www.jstor.org/stable/24860053*.

Weitz, J. S.; Wilhelm, S. W., «Ocean viruses and their effects on microbial communities and biogeochemical cycles», 2012, *F1000 biology reports*, 4, 17, *https://doi.org/10.3410/B4-17*.

Sandaa, R.-A., «Burden or benefit? Virus-host interactions in the marine environment», 2008, *Research in microbiology*, 159, 5, 374-381, *https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092325080800065X*.

Lara, E.; Vaqué, D.; Sà, E. L., *et al.*, «Unveiling the Role and Life Strategies of Viruses from the Surface to the Dark Ocean», 2017, *Science Advances*, 3 (9), e1602565, *https://doi.org/10.1126/sciadv.1602565*.

Giovannoni, S. J., «SAR11 Bacteria: The Most Abundant Plankton in the Oceans», 2017, *Annual Review of Marine Science*, 9, 231-255, https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-marine-010814-015934.

Kirchman, D. L., «A marine virus as foe and friend», 2020, *Nature Microbiology*, 5, 982-983, *https://doi.org/10.1038/s41564-020-0764-3*.

Luhn, A., «Massive marine die-off in Russia could threaten endangered sea otters, other vulnerable species», 2020 *National Geographic*, *https://www.nationalgeographic.com/animals/2020/10/algae-bloom-kills-marine-life-kamchatka-peninsula/*.

Husnik, F.; McCutcheon, J., «Functional horizontal gene transfer from bacteria to eukaryotes», 2018, *Nature Reviews Microbiology*, 16, 67-79, *https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.137*

Needham, D. M.; Yoshizawa, S., Hosaka T., *et al.*, «A Distinct Lineage of Giant Viruses Brings a Rhodopsin Photosystem to Unicellular Marine Predators», 2019, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116 (41), 20574, *https://doi.org/10.1073/pnas.1907517116*.

Rohwer, F.; Thurber, R. V., «Viruses manipulate the marine environment», 2009, *Nature*, 459(7244), 207-212, *https://doi.org/10.1038/nature08060.*

Maeda, T.; Takahashi, S.; Yoshida, T., *et al.*, «Chloroplast Acquisition without the Gene Transfer in Kleptoplastic Sea Slugs, Plakobranchus Ocellatus», 2020, *bioRxiv*, 155838, *https://doi.org/10.1101/2020.06.16.155838*.

Van Steenkiste, N. W. L.; Stephenson, I.; Herranz, M., *et al.*, «A New Case of Kleptoplasty in Animals: Marine Flatworms Steal Functional Plastids from Diatoms», 2019, *Science Advances*, 5(7), *https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw4337.*

Travis, J., «Making the cut«, 2015, *Science*, 350(6267), 1456-1457, https://www.science.org/doi/10.1126/science.350.6267.1456.

Cohen, J., «CRISPR, the revolutionary genetic 'scissors', honored by Chemistry Nobel», 2020, https://www.science.org/content/article/crispr-revolutionary-genetic-scissors-honored-chemistry-nobel.

Brandes, N.; Linial, M., «Giant Viruses – Big Surprises», 2019, *Viruses*, 11(5), 404, *https://doi.org/10.3390/v11050404.*

Bekliz, M.; Colson, P., «La *Scola B.*, The Expanding Family of Virophages», 2016, *Viruses*, 8(11), 317, *https://doi.org/10.3390/v8110317.*

Welsh, J. E.; Steenhuis, P., De Moraes, K. R., *et al.*, «Marine virus predation by non-host organisms», 2020, *Scientific Reports*, 10, 5221, *https://doi.org/10.1038/s41598-020-61691-y.*

Sipkema, D.; Franssen, M. C.; Osinga, R.; Tramper, J.; Wijffels, R. H., «Marine sponges as pharmacy», 2005, *Marine biotechnology*, 7(3), 142-162, *https://doi.org/10.1007/s10126-004-0405-5.*

Seley-Radtke, K. L.; Yates, M. K., «The evolution of nucleoside analogue antivirals: A review for chemists and non-chemists. Part 1: Early structural modifications to the nucleoside scaffold», 2018, *Antiviral research*, 154, 66-86, *https://doi.org/10.1016/j.antiviral.2018.04.004.*

Randazzo, W.; Sánchez, G., «Hepatitis A infections from food», 2020, *Journal of Applied Microbiology*, 129, 1120-1132, *https://ami-journals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jam.14727*.

Yau, S.; Seth-Pasricha, M., «Viruses of Polar Aquatic Environments», 2019, *Viruses*, 11(2), 189, *https://doi.org/10.3390/v11020189.*

Gregory, A. C.; Zayed, A. A.; Conceição-Neto, N., *et al.*, «Marine DNA Viral Macro- and Microdiversity from Pole to Pole», 2019, *Cell*, 177, 1109-1123, e14, *https://doi.org/10.1016/j.cell.2019.03.040.*

Zhang, R.; Li, Y.; Yan W., *et al.*, «Viral control of biomass and diversity of bacterioplankton in the deep sea», 2020, *Communications Biology*, 3, 256, *https://doi.org/10.1038/s42003-020-0974-5.*

Epílogo: lo que aún se esconde ahí fuera

«Australian scientists discover 500 meter tall coral reef in

the great barrier reef-first to be discovered in over 120 years», 2020, Schmidt Ocean Institute, comunicado de prensa del 20 de octubre: *https://schmidtocean.org/australian-scientists-discover-500-meter-tall-coral-reef-in-the-great-barrier-reef-first-to-be-discovered-in-over-120-years/*.

Corriero, G.; Pierri, C.; Mercurio, M., *et al.*, «A Mediterranean mesophotic coral reef built by non-symbiotic scleractinians», 2019, *Scientific Reports*, 9, 3601, *https://doi.org/10.1038/s41598-019-40284-4*.

Yahalomi, D.; Atkinson, S. D.; Neuhof M., *et al.*, «A cnidarian parasite of salmon (Myxozoa: Henneguya) lacks a mitochondrial genoma», 2020, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117, 5358, *https://doi.org/10.1073/pnas.1909907117*.

Starr, M., «Scientists Find The First-Ever Animal That Doesn't Need Oxygen to Survive», 2020, *Science Alert*, *https://www.sciencealert.com/this-is-the-first-known-animal-that-doesn-t-need-oxygen-to-survive*.

Davis, A. L.; Thomas, K. N.; Goetz, F. E., *et al.*, «Ultra-black Camouflage in Deep-Sea Fishes», 2020, *Current Biology*, 30, 3470-3476.e3, *https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.06.044*.

Jennifer, Ch., «MIT engineers develop 'blackest black' material to date», 2019, MIT News Office, *https://news.mit.edu/2019/blackest-black-material-cnt-0913*.

Cui, K.; Wardle, B. L., «Breakdown of Native Oxide Enables Multifunctional, Free-Form Carbon Nanotube—Metal Hierarchical Architectures», 2019, *ACS Publications*, *https:*/pubs.acs.org/doi/10.1021/acsami.9b08290.

«The Ocean Decade», United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development, 2021/2030, *https://www.oceandecade.org/*

«Transformations for a Sustainable Ocean Economy A Vision for Protection, Production and Prosperity», The Ocean Panel, *https://oceanpanel.org/*.

«Mission Starfish 2030: restore our ocean and Waters», 2020, Servicio de Publicaciones de la UE, *http://op.europa.eu/de/publication-detail/-/publication/672ddc53-fc85-11ea-b44f-01aa75ed71a1*.

Zhao, Q.; Stephenson, F.; Lundquist C., *et al.*, «Where Marine Protected Areas would best represent 30 % of ocean biodiversity», 2020, *Biological Conservation*, 244, 108536, *https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108536*.

Weimerskirch, H.; Collet, J.; Corbeau, A., *et al.*, «Ocean sentinel albatrosses locate illegal vessels and provide the first estimate of the extent of nondeclared fishing», 2020, Proceedings of the National Academy of Sciences, 117, 3006, *https://doi.org/10.1073/pnas.1915499117*.

Pheasey, H.; Roberts, D. L.; Rojas-Cañizales, D., *et al.*, «Using GPS-enabled decoy turtle eggs to track illegal trade», 2020, *Current Biology*, 30, R1066-R1068, *https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.08.065*.

Safi, M., «Mumbai beach goes from dump to turtle hatchery in two years», 2018, *The Guardian*, *https://www.theguardian.com/world/2018/mar/30/mumbai-beach-goes-from-dump-to-turtle-hatchery-in-two-years*.

Earp, H. S.; Liconti, A., «Science for the Future: The Use of Citizen Science in Marine Research and Conservation», 2020, en Jungblut, S.; Liebich, V.; Bode-Dalby, M., eds., «YOUMARES 9 – The Oceans: Our Research, Our Future», Springer, Suiza, *https://doi.org/10.1007/978-3-030-20389-4_1*.